



**Gonçalo Manuel de Sousa Rodrigues**

Licenciado em Engenharia Geol3gica

## **RECICLAGEM DO ASIC E DE RCD NA CAMADA DE DRENAGEM DOS ATERROS DE RESÍDUOS**

### **Avaliação da Suscetibilidade à Degradação**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geol3gica  
(Geotecnia)

A presente dissertação foi preparada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no âmbito do protocolo existente entre a FCT-UNL e o LNEC

Orientador: António José Roque, Investigador Principal, LNEC

Co-orientador: Ana Paula da Silva, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Joaquim António Simão

Arguente: Inv. Doutor Filipe Telmo Jeremias

Vogais: Inv. Doutor António José Roque

Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Paula da Silva



**Gonçalo Manuel de Sousa Rodrigues**

Licenciado em Engenharia Geol3gica

**RECICLAGEM DO ASIC E DE RCD NA CAMADA  
DE DRENAGEM DOS ATERROS DE RESÍDUOS**  
***Avaliação da Suscetibilidade à Degradação***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geol3gica  
(Geotecnia)

A presente dissertação foi preparada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
(LNEC) no âmbito do Protocolo existente entre a FCT-UNL e o LNEC

Orientador: António José Roque, Investigador Principal, LNEC

Co-orientador: Ana Paula da Silva, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Joaquim António Simão
Arguente:	Inv. Doutor Filipe Telmo Jeremias
Vogais:	Inv. Doutor António José Roque
	Prof. <sup>a</sup> Doutora Ana Paula da Silva

**setembro 2012**





**Reciclagem do ASIC e de RCD na camada de drenagem dos aterros de resíduos**  
**Avaliação da suscetibilidade à degradação**

Copyright © Gonçalo Manuel de Sousa Rodrigues, 2012

*A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.*



## AGRADECIMENTOS

O estudo realizado para a apresentação desta dissertação possibilitou-me estagiar no Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil I.P., durante o qual tive a oportunidade de ver enriquecida a minha formação académica e científica em virtude da convivência com todas as pessoas com quem tive a oportunidade de trabalhar. Assim, sendo esta dissertação o resultado de um árduo e longo percurso académico, quero expressar o meu profundo agradecimento a todas as pessoas e instituições que me acompanharam e me ajudaram na conclusão deste documento:

- Ao Investigador Doutor António José Roque por toda a paciência demonstrada e pelo incansável apoio prestado na orientação deste trabalho, pelos ensinamentos e rigor científico transmitidos, pelo fornecimento de bibliografia e pelos contactos que estabeleceu, essenciais para a elaboração deste trabalho, e ainda pelas rigorosas críticas e correções durante a revisão deste documento.
- À Professora Doutora Ana Paula da Silva pelo acompanhamento, ensinamentos e boa disposição com que me brindou no decorrer do meu percurso académico, bem como por todo o apoio prestado, e pelas críticas e correções durante a leitura deste documento.
- Ao Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., pela disponibilização de um espaço e de condições de trabalho para a elaboração deste documento.
- À empresa Demotri, S.A., do Grupo Ambigroup, SGPS, S.A., na pessoa do Eng.º João Pedro Almeida, pelo fornecimento da amostra de betão britado processado a partir de resíduos de construção e demolição.
- À Siderurgia Nacional, Empresa de Produtos Longos, S.A., na pessoa do Eng.º António Cavalheiro, pelo fornecimento da amostra do agregado siderúrgico inerte para a construção processado a partir de escórias de aciaria de forno de arco elétrico.
- À empresa Alves Ribeiro, S.A., na pessoa do Eng.º Nuno Neves, pelo fornecimento da amostra de basalto.
- À empresa Agrepor, S.A., na pessoa do Eng.º Rui Ferreira, pelo fornecimento da amostra de calcário.
- À empresa Amarsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., na pessoa do Eng.º Nuno Lobato, pelo fornecimento da amostra de lixiviado do aterro de resíduos sólidos urbanos do Seixal.
- Ao Professor Doutor Joaquim Simão pelo apoio prestado na análise petrográfica dos materiais estudados, pelo fornecimento de bibliografia e pela cedência da máquina fotográfica para as microfotografias.
- Aos técnicos do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., nas pessoas de Amélia Reis, de Ana Cristina Louro e de Joaquim Remédios, por todo o apoio e ensinamentos transmitidos durante os ensaios de laboratório.
- À equipa de prospeção geofísica do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., pelo fornecimento do equipamento necessário para a preparação dos provetes utilizados nos ensaios de desgaste em meio aquoso e pelos ensinamentos na sua execução.

- Ao Laboratório de Mecânica das Rochas do Núcleo de Fundações e Obras Subterrâneas do Departamento de Barragens de Betão do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., na pessoa do Eng.º Técnico Daniel Duarte Vicente, pelo corte das amostras dos quatro materiais selecionados para este estudo.
- Ao Núcleo de Engenharia Sanitária do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., na pessoa de Vítor Napier, pelo armazenamento do lixiviado recolhido no aterro de resíduos da AMARSUL e pela disponibilização do espaço e do equipamento necessário para o controlo das propriedades físicas e químicas da água e do lixiviado utilizados nos ensaios de desgaste em meio aquoso.
- Ao Núcleo de Materiais Metálicos do Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., na pessoa de Luzia Cascalheira Barracha, pelo auxílio no processo de acidificação do lixiviado recolhido no aterro de resíduos da AMARSUL.
- Ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e ao Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa pela preparação das lâminas delgadas utilizadas no estudo micropetrográfico.

## RESUMO

A suscetibilidade à degradação de dois agregados reciclados, provenientes de escórias de aciaria de Forno de Arco Elétrico - FAE, e de Resíduos de Construção e Demolição - RCD, foi avaliada com o objetivo de promover a sua valorização na camada de drenagem do sistema de proteção basal dos aterros de resíduos.

O estudo utilizou, como base, o ensaio de Desgaste em Meio Aquoso - DMA, da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, mas foi executado sob condições mais agressivas que as previstas no método. Para tal, usou-se ainda um lixiviado como meio aquoso adicional recolhido num aterro de resíduos, acidificado de 7,6 para 5,5, e aos dois ciclos de rotação, cada um com 200 rotações, seguiu-se um terceiro ciclo de 600 rotações. A influência do tempo no comportamento dos dois materiais foi avaliada mediante a sua imersão prévia por um período de 15 dias no lixiviado. Como referência para o comportamento dos dois materiais, os mesmos ensaios foram realizados com água. Os resultados são comparados com o comportamento de dois agregados naturais, o basalto e o calcário, testados em condições idênticas.

Em complemento aos ensaios de desgaste procedeu-se, antes e após a sua realização, à caracterização petrográfica e à caracterização física dos quatro materiais ensaiados.

Os resultados obtidos evidenciam a adequabilidade dos materiais para a aplicação estudada.

**Palavras-chave:** Escória de aciaria de FAE, Resíduos de Construção e Demolição - RCD, lixiviado, reciclagem de resíduos, durabilidade, camada de drenagem, aterro de resíduos.



## **ABSTRACT**

The durability of two selected recycled aggregates, produced from Electric Arc Furnace steel slag - EAF, and Construction and Demolition Waste - C&DW, has been evaluated with a view to promote their recycling in the leachate collection and removal layer of landfills.

The durability of two recycled aggregates has been studied using the slake-durability test proposed by the International Society for Rock Mechanics - ISRM, but under more aggressive conditions than those proposed in the ISRM Suggested Method. For such, the aqueous solution used in the test has been a leachate collected at a landfill. The leachate has been afterwards acidified in laboratory from a pH of 7.6 to a pH of 5.5. For similar reasons, in addition to two rotation cycles of 200 rotations, foreseen in the ISRM Suggested Method, a third cycle of 600 rotations has also been carried out. The influence of time on the behavior of two materials has been also evaluated by their previous immersion for a 15-day in the acidified leachate. As a reference for the behavior of two materials, similar tests have been performed with water as aqueous solution. The global results obtained with two recycled aggregates have been compared with the behavior of two raw aggregates (basalt and limestone), tested in the same conditions as the recycled aggregates.

In complement to the slake-durability test, a petrographic and a physical characterization of four materials have been performed, before and after testing.

The results achieved have shown the suitability of all four materials for the studied application.

**Key-words:** EAF steel slag, Construction and Demolition Waste - C&DW, leachate, waste recycling, durability, drainage layer, landfill.





# ÍNDICE DE MATÉRIAS

1 - INTRODUÇÃO .....	- 1 -
1.1 - Justificação do tema e enquadramento.....	- 1 -
1.2 - Objetivos.....	- 4 -
1.3 - Metodologia de estudo .....	- 4 -
1.4 - Estrutura da dissertação.....	- 5 -
2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	- 9 -
2.1 - Enquadramento das políticas de gestão integrada de resíduos .....	- 9 -
2.1.1 - Considerações gerais .....	- 9 -
2.1.2 - Enquadramento geral .....	- 10 -
2.1.3 - Enquadramento específico .....	- 14 -
2.1.3.1 - Aplicação aos RCD .....	- 14 -
2.1.3.1.1 - A nível nacional .....	- 14 -
2.1.3.1.2 - A nível internacional .....	- 17 -
2.1.3.2 - Aplicação às escórias de aciaria de FAE.....	- 18 -
2.1.3.2.1 - A nível nacional .....	- 18 -
2.1.3.2.2 - A nível internacional .....	- 18 -
2.2 - Regulamentação técnica para os RCD e para as escórias de aciaria de FAE.....	- 19 -
2.3 - Aterro de resíduos e camada de drenagem e recolha dos lixiviados .....	- 21 -
2.3.1 - Considerações gerais .....	- 21 -
2.3.2 - Legislação.....	- 23 -
2.3.3 - Principais componentes estruturais.....	- 25 -
2.3.3.1 - Sistema de proteção basal passivo .....	- 26 -
2.3.3.2 - Sistema de proteção basal ativo .....	- 27 -
2.3.3.3 - Sistema de selagem final .....	- 29 -
2.3.4 - Particularidades da camada de drenagem e recolha de lixiviados .....	- 30 -
2.3.5 - Produção e caracterização dos lixiviados.....	- 33 -
2.3.5.1 - Produção de lixiviados e fatores intervenientes.....	- 33 -
2.3.5.2 - Características dos lixiviados .....	- 34 -
2.4 - Resíduos selecionados.....	- 37 -
2.4.1 - RCD .....	- 37 -
2.4.1.1 - Considerações gerais.....	- 37 -
2.4.1.2 - Origem dos RCD .....	- 39 -
2.4.1.3 - Classificação dos RCD.....	- 41 -
2.4.1.3.1 - Com base na origem .....	- 41 -
2.4.1.3.2 - Com base na composição .....	- 43 -
2.4.1.3.3 - Com base no destino final .....	- 47 -
2.4.1.4 - Produção dos RCD .....	- 48 -

2.4.1.4.1 - A nível nacional .....	- 48 -
2.4.1.4.2 - A nível internacional .....	- 50 -
2.4.1.5 - Caracterização dos RCD-R.....	- 52 -
2.4.1.5.1 - Avaliação da perigosidade ambiental.....	- 52 -
2.4.1.5.2 - Caracterização química e mineralógica .....	- 54 -
a) Composição química.....	- 54 -
b) Composição mineralógica.....	- 56 -
2.4.1.5.3 - Caracterização geométrica, física e mecânica.....	- 57 -
2.4.1.6 - Valorização dos RCD-R na construção .....	- 60 -
2.4.1.6.1 - Sistemas de drenagem.....	- 62 -
2.4.1.6.2 - Outras aplicações .....	- 63 -
2.4.2 - Escórias de aciaria de FAE.....	- 65 -
2.4.2.1 - Considerações gerais.....	- 65 -
2.4.2.2 - Origem das escórias de aciaria de FAE.....	- 67 -
2.4.2.3 - Classificação das escórias de aciaria de FAE .....	- 69 -
2.4.2.4 - Produção das escórias de aciaria de FAE .....	- 71 -
2.4.2.4.1 - A nível nacional .....	- 71 -
2.4.2.4.2 - A nível internacional .....	- 71 -
2.4.2.5 - Caracterização das escórias de aciaria de FAE processadas.....	- 72 -
2.4.2.5.1 - Avaliação da perigosidade ambiental.....	- 72 -
2.4.2.5.2 - Caracterização química e mineralógica .....	- 74 -
a) Composição química.....	- 74 -
b) Composição mineralógica.....	- 76 -
2.4.2.5.3 - Caracterização geométrica, física e mecânica.....	- 77 -
2.4.2.6 - Valorização das escórias de aciaria de FAE processadas na construção .....	- 80 -
2.4.2.6.1 - Sistemas de drenagem.....	- 81 -
2.4.2.6.2 - Outras aplicações .....	- 81 -
2.5 - Durabilidade dos materiais .....	- 84 -
2.5.1 - Considerações gerais .....	- 84 -
2.5.2 - Algumas definições .....	- 86 -
2.5.3 - Algumas noções sobre a alteração das rochas.....	- 88 -
2.5.3.1 - Mecanismos de alteração física .....	- 89 -
2.5.3.1.1 - Abrasão.....	- 90 -
2.5.3.1.2 - Crescimento de cristais .....	- 90 -
2.5.3.1.3 - Expansão .....	- 91 -
2.5.3.1.4 - Secagem e embebição .....	- 91 -
2.5.3.1.5 - Cavitação .....	- 92 -
2.5.3.1.6 - Fracturação por libertação de tensões e desnudação .....	- 92 -
2.5.3.1.7 - Insolação.....	- 93 -
2.5.3.2 - Mecanismos de alteração química.....	- 93 -

2.5.3.2.1 - Carbonatação .....	- 94 -
2.5.3.2.2 - Complexação .....	- 95 -
2.5.3.2.3 - Hidratação .....	- 95 -
2.5.3.2.4 - Hidrólise .....	- 95 -
2.5.3.2.5 - Oxidação e redução.....	- 96 -
2.5.3.2.6 - Dissolução .....	- 96 -
2.5.4 - Efeitos da alteração nas propriedades das rochas .....	- 97 -
2.5.4.1 - Resistência mecânica .....	- 97 -
2.5.4.2 - Deformabilidade .....	- 97 -
2.5.4.3 - Porosidade .....	- 98 -
2.5.5 - Importância da alteração na durabilidade das rochas .....	- 98 -
2.5.6 - Métodos de avaliação da durabilidade .....	- 100 -
2.5.6.1 - Considerações gerais.....	- 100 -
2.5.6.2 - Ensaio de DMA .....	- 103 -
2.5.7 - Casos de estudo de avaliação da durabilidade de basaltos e calcários .....	- 106 -
2.5.7.1 - Basaltos.....	- 106 -
2.5.7.1.1 - Sharma e Singh (2008).....	- 106 -
2.5.7.1.2 - Ozsoy <i>et al.</i> (2010) .....	- 106 -
2.5.7.2 - Calcários.....	- 107 -
2.5.7.2.1 - Delgado Rodrigues (1986).....	- 107 -
2.5.7.2.2 - Conde <i>et al.</i> (2004) .....	- 108 -
2.5.7.2.3 - Dhakal <i>et al.</i> (2004) .....	- 108 -
2.5.7.2.4 - Kolay e Kayabali (2006).....	- 109 -
2.6 - Notas finais .....	- 110 -
3 - ESTUDO EXPERIMENTAL .....	- 113 -
3.1 - Considerações iniciais .....	- 113 -
3.2 - Materiais .....	- 114 -
3.2.1 - AB <sub>RCD</sub> .....	- 114 -
3.2.1.1 - Localização geográfica.....	- 114 -
3.2.1.2 - Processamento .....	- 114 -
3.2.1.3 - Amostragem .....	- 117 -
3.2.2 - ASIC.....	- 118 -
3.2.2.1 - Localização geográfica.....	- 118 -
3.2.2.2 - Processamento .....	- 119 -
3.2.2.3 - Amostragem .....	- 121 -
3.2.3 - Basalto .....	- 122 -
3.2.3.1 - Localização geográfica.....	- 122 -
3.2.3.2 - Enquadramento geológico .....	- 123 -
3.2.3.3 - Processamento .....	- 124 -
3.2.3.4 - Amostragem .....	- 126 -
	- ix -

3.2.4 - Calcário .....	- 127 -
3.2.4.1 - Localização geográfica.....	- 127 -
3.2.4.2 - Enquadramento geológico .....	- 127 -
3.2.4.3 - Processamento .....	- 129 -
3.2.4.4 - Amostragem .....	- 131 -
3.2.5 - Lixiviado .....	- 132 -
3.2.5.1 - Localização geográfica.....	- 132 -
3.2.5.2 - Características do aterro .....	- 133 -
3.2.5.3 - Características dos resíduos depositados .....	- 134 -
3.2.5.4 - Características do lixiviado.....	- 136 -
3.2.5.5 - Amostragem .....	- 137 -
3.3 - Métodos e equipamentos .....	- 138 -
3.3.1 - Caracterização petrográfica.....	- 138 -
3.3.1.1 - Macropetrografia .....	- 138 -
3.3.1.1.1 - Equipamento.....	- 138 -
3.3.1.1.2 - Metodologia .....	- 139 -
a) Preparação dos provetes .....	- 140 -
b) Procedimento para a execução da análise .....	- 142 -
3.3.1.2 - Micropetrografia .....	- 143 -
3.3.1.2.1 - Equipamento.....	- 143 -
3.3.1.2.2 - Metodologia .....	- 143 -
a) Preparação das lâminas delgadas.....	- 144 -
b) Procedimento para a execução da análise .....	- 145 -
3.3.2 - Caracterização física .....	- 146 -
3.3.2.1 - Equipamento .....	- 146 -
3.3.2.2 - Metodologia .....	- 147 -
3.3.2.2.1 - Preparação dos provetes.....	- 147 -
3.3.2.2.2 - Procedimento para a execução do ensaio .....	- 148 -
3.3.3 - Ensaio de DMA .....	- 151 -
3.3.3.1 - Equipamento .....	- 151 -
3.3.3.2 - Metodologia .....	- 152 -
3.3.3.2.1 - Preparação dos provetes.....	- 153 -
3.3.3.2.2 - Procedimento para a acidificação do lixiviado.....	- 155 -
3.3.3.2.3 - Procedimento para a imersão dos provetes.....	- 158 -
3.3.3.2.4 - Procedimento para a execução do ensaio .....	- 160 -
3.4 - Resultados obtidos e análise.....	- 163 -
3.4.1 - Petrografia inicial dos materiais.....	- 163 -
3.4.1.1 - AB <sub>RCD</sub> .....	- 163 -
3.4.1.2 - ASIC .....	- 166 -
3.4.1.3 - Basalto.....	- 168 -

3.4.1.4 - Calcário .....	- 169 -
3.4.2 - Características físicas iniciais dos materiais .....	- 170 -
3.4.2.1 - $AB_{RCD}$ .....	- 170 -
3.4.2.2 - ASIC .....	- 172 -
3.4.2.3 - Basalto .....	- 174 -
3.4.2.4 - Calcário .....	- 174 -
3.4.2.5 - Análise comparativa das características físicas iniciais dos materiais .....	- 175 -
3.4.3 - Durabilidade dos materiais .....	- 177 -
3.4.3.1 - Meio aquoso: água .....	- 177 -
3.4.3.1.1 - Sem imersão prévia dos provetes .....	- 177 -
a) $I_d$ dos materiais .....	- 177 -
b) Parâmetros químicos do meio aquoso .....	- 178 -
3.4.3.1.2 - Com imersão prévia dos provetes (15 dias) .....	- 181 -
a) $I_d$ dos materiais .....	- 181 -
a) Parâmetros químicos do meio aquoso .....	- 181 -
3.4.3.2 - Meio aquoso: lixiviado .....	- 185 -
3.4.3.2.1 - Sem imersão prévia dos provetes .....	- 185 -
a) $I_d$ dos materiais .....	- 185 -
b) Parâmetros químicos do meio aquoso .....	- 186 -
3.4.3.2.2 - Com imersão prévia dos provetes (15 dias) .....	- 188 -
a) $I_d$ dos materiais .....	- 188 -
a) Parâmetros químicos do meio aquoso .....	- 189 -
3.4.3.3 - Análise comparativa da durabilidade dos materiais .....	- 193 -
3.4.4 - Petrografia dos materiais após ensaio de DMA .....	- 196 -
3.4.4.1 - $AB_{RCD}$ .....	- 196 -
3.4.4.2 - ASIC .....	- 200 -
3.4.4.3 - Basalto .....	- 205 -
3.4.4.4 - Calcário .....	- 210 -
3.4.4.5 - Análise comparativa da petrografia dos materiais após ensaio de DMA .....	- 214 -
3.4.5 - Características físicas dos materiais após ensaio de DMA .....	- 215 -
3.4.5.1 - $AB_{RCD}$ .....	- 215 -
3.4.5.2 - ASIC .....	- 217 -
3.4.5.3 - Basalto .....	- 218 -
3.4.5.4 - Calcário .....	- 219 -
3.4.5.5 - Análise comparativa das características físicas dos materiais após ensaio de DMA .....	- 221 -
3.5 - Conclusões finais .....	- 221 -
4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	- 225 -
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	- 229 -
ANEXOS .....	- 245 -
	- xi -

Anexo I - Definição dos diversos tipos de resíduos sólidos .....	- 246 -
Anexo II - Definição de alguns termos apresentados no DL nº 73/2011 .....	- 247 -
Anexo III - Princípios gerais de gestão de resíduos definidos no DL nº 73/2011 .....	- 248 -
Anexo IV - Definição de subproduto e de fim do estatuto de resíduo .....	- 250 -
Anexo V - Taxas de Gestão de Resíduos .....	- 251 -
Anexo VI - Mercado de resíduos .....	- 252 -
Anexos VII - Principais documentos legislativos em matéria de resíduos aprovados em Portugal nos últimos anos.....	- 253 -
Anexo VIII - Principais medidas implementadas em relação à gestão de RCD, em vários estados-membros da UE .....	- 255 -
Anexo IX - Principais medidas implementadas em relação à gestão das escórias de aciaria de FAE em vários estados-membros da UE .....	- 261 -

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Hierarquia da gestão de resíduos adotada pela UE e seguida por Portugal .....	12 -
Figura 2.2 Hierarquia de gestão de RCD em obra .....	16 -
Figura 2.3 Representação esquemática de um aterro de resíduos .....	26 -
Figura 2.4 Representação esquemática do sistema de proteção basal, barreira passiva e ativa, dos aterros de resíduos, em acordo com o DL nº 183/2009 (fundo e taludes laterais interiores) ...	28 -
Figura 2.5 Representação esquemática do sistema de selagem final dos aterros de resíduos, em acordo com o DL nº 183/2009 .....	30 -
Figura 2.6 Detalhe do sistema de drenagem e recolha de lixiviados .....	31 -
Figura 2.7 Esquematização de um modelo do sistema de drenagem e recolha de lixiviados .....	31 -
Figura 2.8 Movimentos de infiltração e lixiviação num aterro .....	34 -
Figura 2.9 Variação da concentração de alguns parâmetros químicos dos lixiviados em função da fase em que se encontra o aterro de resíduos .....	36 -
Figura 2.10 Técnica de demolição: a) manual; b) mecânica .....	41 -
Figura 2.11 Duas fileiras de resíduos de RCD: a) solos e rochas; b) betão armado .....	42 -
Figura 2.12 Comparação entre as concentrações de $SiO_2$ , $CaO$ e $Al_2O_3$ nos provetes analisados por: a) Angulo <i>et al.</i> (2009); e b) Limbachiya <i>et al.</i> (2006), com as existentes em outros materiais .....	56 -
Figura 2.13 Resultados obtidos da análise química realizada por Angulo (2005) sobre várias frações granulométricas do GS .....	56 -
Figura 2.14 Reciclagem de RCD-R em percentagem da quantidade produzida .....	62 -
Figura 2.15 FAE .....	67 -
Figura 2.16 Esquema simplificado da produção de aço nos FAE .....	68 -
Figura 2.17 Tipos de escória .....	69 -
Figura 2.18 Escórias de aciaria de FAE: a) negra e b) branca .....	70 -
Figura 2.19 Taxa de utilização das escórias de aciaria de FAE processadas em diversas áreas de aplicação na Europa .....	84 -
Figura 2.20 Resultados dos ensaios de DMA para os diferentes tipos de rocha estudadas .....	109 -
Figura 3.1 Localização geográfica dos armazéns da Demotri, com as coordenadas seguintes: 38°36'14.71"N; 9°05'04.63"O .....	114 -
Figura 3.2 Esquematização da quarta etapa do processamento dos RCD .....	115 -
Figura 3.3 Exemplos do equipamento utilizado durante a quarta etapa de processamento dos RCD: a) britagem; b) separação magnética; c) crivagem .....	116 -
Figura 3.4 Armazenamento dos RCD-R no parque .....	116 -
Figura 3.5 Amostragem do $AB_{RCD}$ : a) pilha de material existente na central de reciclagem da Demotri no seixal; b) recolha da amostra.....	118 -
Figura 3.6 Localização geográfica da SN do Seixal, com as coordenadas seguintes: 38°37'43.37"N; 9°04'50.19"O .....	118 -

Figura 3.7 Vazamento das escórias para um fosso .....	119 -
Figura 3.8 a) Arrefecimento primário das escórias na zona impermeabilizada; b) arrefecimento secundário .....	120 -
Figura 3.9 a) Fragmentação; b) parte metálica obtida da separação das partes metálicas e não metálicas, a reutilizar na produção do aço .....	120 -
Figura 3.10 Peneiração em frações granulométricas .....	121 -
Figura 3.11 Amostragem do ASIC: a) pilha de material existente no parque de armazenamento da SN do Seixal; b) recolha da amostra.....	122 -
Figura 3.12 Localização geográfica da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra, com as coordenadas seguintes: 38°53'17.73"N; 9°04'02.48"O .....	123 -
Figura 3.13 Enquadramento geológico da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra .....	124 -
Figura 3.14 Frente de exploração da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra: a) vista geral; b) vista de detalhe.....	125 -
Figura 3.15 a) Unidade de britagem com seis silos; b) brita 2, 10 mm - 16 mm .....	125 -
Figura 3.16 Amostragem do basalto: a) pilha de material pré-britado existente no parque de armazenamento da central de processamento da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra; b) recolha da amostra.....	126 -
Figura 3.17 Localização geográfica da Pedreira Vale Grande nº 2, com as coordenadas seguintes: 39°05'27.59"N; 9°01'03.29"O .....	127 -
Figura 3.18 Enquadramento geológico da Pedreira Vale Grande nº 2 .....	128 -
Figura 3.19 Ciclo de produção da pedreira.....	129 -
Figura 3.20 Ciclo de exploração da pedreira .....	129 -
Figura 3.21 Perfil da exploração: a) fase intermédia; b) fase final.....	130 -
Figura 3.22 a) Central de processamento da Pedreira Vale Grande nº 2; b) armazenamento temporário de calcário após britagem.....	131 -
Figura 3.23 Amostragem do calcário: a) pilha de material existente no parque de armazenamento da central de processamento da Pedreira Vale Grande nº 2; b) recolha da amostra.....	131 -
Figura 3.24 Localização geográfica do aterro de resíduos da AMARSUL, com as coordenadas seguintes: 38°36'38.50"N; 9°08'51.30"O .....	133 -
Figura 3.25 Amostragem do lixiviado: a) bombagem do lixiviado a partir do poço de recolha; b) transferência do lixiviado para os recipientes de recolha e transporte.....	137 -
Figura 3.26 Material utilizado no estudo macropetrográfico: a) lupa (régua de escala em cm); b) frasco com <i>HCl</i> .....	138 -
Figura 3.27 Lupa binocular.....	139 -
Figura 3.28 Exemplo de provetes utilizados no estudo macroscópico: a) Cal; b) ASIC; c) Cal_DMA_A; d) ASIC_DMA_L; e) Cal_DMA_L; f) ASIC_DMA_L.....	141 -
Figura 3.29 Equipamento utilizado no estudo micropetrográfico: microscópio petrográfico .....	143 -
Figura 3.30 Exemplo de lâminas delgadas utilizadas no estudo microscópico: a) ASIC; b) Cal_DMA_L; c) Bas_DMA_L; d) AB <sub>RCD</sub> _DMA_L .....	145 -



Figura 3.31 Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização física: a) recipiente de plástico; b) exsiccador aberto; c) (C.1) exsiccador fechado, (C.2) reservatório de 5 l com água desmineralizada, e (C.3) bomba de vácuo; d) (D.1) balança com precisão centesimal, (D.2) cesto em rede metálica, e (D.3) balde em plástico .....	146 -
Figura 3.32 Exemplo de provetes utilizados nos ensaios de caracterização física: a) Bas_DMA_A; b) Bas_DMA_L.....	148 -
Figura 3.33 Procedimento para a realização das duas primeiras etapas do ensaio de caracterização física: a) quatro conjuntos com 6 provetes cada nos recipientes em plástico: b) recipientes e provetes no exsiccador; c) provetes sujeitos à pressão de 1 bar; d) introdução de água desmineralizada no exsiccador.....	149 -
Figura 3.34 Procedimento para a realização da terceira etapa do ensaio de caracterização física: a) pesagem da massa saturada de um provete de calcário imerso; b) pesagem da massa saturada de um provete de calcário com as faces enxutas .....	150 -
Figura 3.35 a) Equipamento utilizado no ensaio de DMA; b) pormenor do tambor.....	151 -
Figura 3.36 Conjunto tambor+recipiente: a) dimensões do tambor e disposição relativa do tambor e do meio aquoso em relação ao recipiente; b) conjunto tambor+recipiente visto de perfil .....	152 -
Figura 3.37 Primeira fase de preparação dos provetes de calcário: a) amostra inicial; b) 10 cubos provenientes da máquina de corte .....	154 -
Figura 3.38 Material utilizado na segunda fase de preparação dos provetes: a) (A.1) escopro e (A.2) martelo; b) esmerilador.....	154 -
Figura 3.39 Exemplo de provetes utilizados nos ensaios de DMA: a) 10 provetes de ASIC; b) 10 provetes de AB <sub>RCD</sub> ; c) 10 provetes de basalto; d) 10 provetes de calcário.....	155 -
Figura 3.40 Material e equipamento utilizados no processo de acidificação do lixiviado: a) (A.1) frasco com solução a 50% de <i>HCl</i> , (A.2) pipeta volumétrica de 10 ml e (A.3) pompeta; b) (B.1) copo de precipitação de 3000 ml e (B.2) barra magnética cilíndrica de 45 mm de comprimento; c) agitador eletromagnético; d) (D.1) multímetro eletroquímico Consort C831, e (D.2) elétrodo de Eh, (D.3) de pH, e (D.4) de C.E.; e) frasco lavador .....	156 -
Figura 3.41 Procedimento adotado para a acidificação do lixiviado: a) copo de precipitação com 2500 ml de lixiviado no agitador magnético; b) homogeneização do lixiviado e instalação do elétrodo de pH; c) adição de 10 ml da solução a 50% de <i>HCl</i> ao lixiviado, com controlo do pH; d) formação de espuma na superfície do lixiviado em reação à adição da solução de <i>HCl</i> .....	157 -
Figura 3.42 a) Cesto de rede metálica inoxidável; b) 20 provetes de AB <sub>RCD</sub> colocados no cesto de rede metálica; c) recipiente em plástico com cesto de rede metálica; d) 20 provetes de AB <sub>RCD</sub> imersos no lixiviado e 20 em água .....	158 -
Figura: 3.43 Procedimento adotado na imersão dos provetes de AB <sub>RCD</sub> : a) aspeto dos 20 provetes após imersão em água; b) aspeto dos 20 provetes após imersão no lixiviado; c) arrefecimento dos dois conjuntos de 20 provetes nos exsiccadores; d) pesagem dos 20 provetes que estiveram imersos em água; e) pesagem dos 20 provetes que estiveram imersos no lixiviado .....	160 -

Figura: 3.44 Primeira etapa do procedimento de realização do ensaio de DMA: a) introdução de 10 provetes no tambor; b) secagem de tambor+provetes na estufa; c) arrefecimento do tambor+provetes no exsiccador; d) pesagem do provetes+tambor.....	- 161 -
Figura: 3.45 Segunda etapa de ensaio: a) montagem dos quatro tambores+provetes, nos recipientes; b) dois conjuntos tambor+provetes parcialmente imersos em lixiviado; c) dois conjuntos tambor+provetes parcialmente imersos em água; d) pormenor do conjunto tambor+provetes montado no recipiente preenchido com água.....	- 162 -
Figura 3.46 Aspeto macroscópico do provete $AB_{RCD}$ : a) vista geral; b) vista pormenorizada .....	- 164 -
Figura 3.47 Microfotografias da lâmina delgada $AB_{RCD}$ : a) Nicóis Cruzados - NX, com ampliação de 50x; b) Nicóis Paralelos - N//, com ampliação de 50x.....	- 165 -
Figura 3.48 Microfotografias da lâmina delgada $AB_{RCD}$ : a) cristal de quartzo com diferentes cores de polarização, em NX com ampliação de 50x; b) cristal de quartzo, em N// com ampliação de 50x .....	- 166 -
Figura 3.49 Aspeto macroscópico do provete ASIC: a) vista geral; b) vista pormenorizada.....	- 167 -
Figura 3.50 Microfotografias da lâmina delgada ASIC: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x; c) NX com ampliação de 200x; d) N// com ampliação de 200x .....	- 167 -
Figura: 3.51 Aspeto macroscópico do provete Bas: a) vista geral e b) vista pormenorizada .....	- 168 -
Figura 3.52 Microfotografias da lâmina delgada Bas: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x .....	- 169 -
Figura 3.53 Aspeto macroscópico do provete Cal: a) vista geral e b) vista pormenorizada.....	- 169 -
Figura 3.54 Microfotografias da lâmina delgada Cal: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x .....	- 170 -
Figura 3.55 Comparação dos valores médios da $M_{VR}$ e da $M_{VA}$ obtidos nos materiais estudados	- 176 -
Figura 3.56 Comparação dos valores médios da $P_e$ obtidos nos materiais estudados.....	- 176 -
Figura 3.57 Comparação dos valores médios do $w_{max}$ obtidos nos materiais estudados .....	- 176 -
Figura 3.58 Comparação dos valores médios do $I_{d1}$ , $I_{d2}$ e $I_{d5}$ dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados com a água .....	- 178 -
Figura 3.59 Variação dos valores médios do pH da água durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados .....	- 178 -
Figura 3.60 Variação dos valores médios do Eh da água durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados .....	- 179 -
Figura 3.61 Variação dos valores médios da C.E. da água durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados .....	- 179 -
Figura 3.62 Comparação dos valores médios do $I_{d1}$ , $I_{d2}$ e $I_{d5}$ dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados em água, após imersão prévia dos provetes por 15 dias-	- 181 -
Figura 3.63 Variação do pH da água durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA.....	- 183 -
Figura 3.64 Variação do Eh da água durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA.....	- 183 -

Figura 3.65 Variação da C.E. da água durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA .....	183 -
Figura 3.66 Comparação dos valores médios do $I_{d1}$ , $I_{d2}$ e $I_{d5}$ dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados com o lixiviado .....	186 -
Figura 3.67 Variação dos valores médios do pH do lixiviado durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados .....	186 -
Figura 3.68 Variação dos valores médios do Eh do lixiviado durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados .....	187 -
Figura 3.69 Variação dos valores médios da C.E. do lixiviado durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados .....	187 -
Figura 3.70 Comparação dos valores médios do $I_{d1}$ , $I_{d2}$ e $I_{d5}$ dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados no lixiviado, após imersão prévia dos provetes por 15 dias .....	189 -
Figura 3.71 Variação do pH do lixiviado durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA .....	191 -
Figura 3.72 Variação do Eh do lixiviado durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA .....	191 -
Figura 3.73 Variação da C.E. do lixiviado durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA .....	191 -
Figura 3.74 Comparação dos valores obtidos para $I_{d1}$ , $I_{d2}$ e $I_{d5}$ nos quatro materiais em estudo em relação à classificação de Gamble (1971) para o $I_{d5}$ .....	193 -
Figura 3.75 Aspeto macroscópico do provete AB <sub>RCD_DMA_A</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	197 -
Figura 3.76 Aspeto macroscópico do provete AB <sub>RCD_DMA<sub>I</sub>_A</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	197 -
Figura 3.77 Aspeto macroscópico do provete AB <sub>RCD_DMA_L</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	198 -
Figura 3.78 Aspeto macroscópico do provete AB <sub>RCD_DMA<sub>I</sub>_L</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	198 -
Figura 3.79 Microfotografias da lâmina delgada AB <sub>RCD_DMA_A</sub> : a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x.....	199 -
Figura 3.80 Microfotografias da lâmina delgada AB <sub>RCD_DMA<sub>I</sub>_A</sub> : a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x.....	199 -
Figura 3.81 Microfotografias da lâmina delgada AB <sub>RCD_DMA_L</sub> : a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x.....	200 -
Figura 3.82 Microfotografias da lâmina delgada AB <sub>RCD_DMA<sub>I</sub>_L</sub> : a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x.....	200 -
Figura 3.83 Aspeto macroscópico do provete ASIC_DMA_A: a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	201 -

Figura 3.84 Aspeto macroscópico do provete ASIC_DMA <sub>I</sub> _A: a) e c) visão geral; b) e d) visão pormenorizada.....	- 201 -
Figura 3.85 Aspeto macroscópico do provete ASIC_DMA <sub>L</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 202 -
Figura 3.86 Aspeto macroscópico do provete AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>L</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 202 -
Figura 3.87 Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA <sub>A</sub> : a) NX com ampliação de 200x; b) N// com ampliação de 200x.....	- 203 -
Figura 3.88 Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA <sub>I</sub> _A: a) NX com ampliação de 200x; b) N// com ampliação de 200x.....	- 203 -
Figura 3.89 Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA <sub>L</sub> : a) e c) NX com ampliação de 200x; b) e d) N// com uma ampliação de 200x.....	- 204 -
Figura 3.90 Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA <sub>I</sub> _L: a) NX com ampliação de 200x; b) N// com ampliação de 200x.....	- 204 -
Figura 3.91 Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA <sub>A</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 206 -
Figura 3.92 Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA <sub>I</sub> _A: a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 206 -
Figura 3.93 Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA <sub>L</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 207 -
Figura 3.94 Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA <sub>I</sub> _L: a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 207 -
Figura 3.95 Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA <sub>A</sub> : a) e c) NX com ampliação de 100x; b) e d) N// com uma ampliação de 100x.....	- 208 -
Figura 3.96 Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA <sub>I</sub> _A: a) NX com ampliação de 100x; b) N// com ampliação de 100x.....	- 208 -
Figura 3.97 Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA <sub>L</sub> : a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x.....	- 209 -
Figura 3.98 Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA <sub>I</sub> _L: a) e c) NX com ampliação de 50x; b) e d) N// com ampliação de 50x.....	- 209 -
Figura 3.99 Aspeto macroscópico do provete Cal_DMA <sub>A</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 211 -
Figura 3.100 Aspeto macroscópico do provete Cal_DMA <sub>I</sub> _A: a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 211 -
Figura 3.101 Aspeto macroscópico do provete Cal_DMA <sub>L</sub> : a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 212 -
Figura 3.102 Aspeto macroscópico do provete Cal_DMA <sub>I</sub> _L: a) visão geral; b) visão pormenorizada.....	- 212 -
Figura 3.103 Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA <sub>A</sub> : a) NX com ampliação de 100x; b) N// com ampliação de 100x.....	- 213 -

Figura 3.104 Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA <sub>I</sub> _A: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x.....	- 213 -
Figura 3.105 Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA <sub>L</sub> : a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x.....	- 214 -
Figura 3.106 Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA <sub>I</sub> _L: a) NX com ampliação de 100x; b) N// com ampliação de 100x.....	- 214 -
Figura 3.107 Valores médios da $M_{VR}$ e da $M_{VA}$ do AB <sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA e comparação com os seus valores médios antes do ensaio de DMA (símbolos a verde) .....	- 216 -
Figura 3.108 Valores médios da $P_e$ do AB <sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 216 -
Figura 3.109 Valores médios do $w_{max}$ do AB <sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 216 -
Figura 3.110 Valores médios da $M_{VR}$ e da $M_{VA}$ do ASIC após os ensaios de DMA e comparação com os seus valores médios antes do ensaios de DMA (símbolos a verde).....	- 217 -
Figura 3.111 Valores médios da $P_e$ do ASIC após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 217 -
Figura 3.112 Valores médios do $w_{max}$ do ASIC após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 218 -
Figura 3.113 Valores médios da $M_{VR}$ e da $M_{VA}$ do basalto após os ensaios de DMA e comparação com os seus valores médios antes do ensaio de DMA (símbolos a verde) .....	- 219 -
Figura 3.114 Valores médios da $P_e$ do basalto após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 219 -
Figura 3.115 Valores médios do $w_{max}$ do basalto após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 219 -
Figura 3.116 Valores médios da $M_{VR}$ e da $M_{VA}$ do calcário após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde).....	- 220 -
Figura 3.117 Valores médios da $P_e$ do calcário após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 220 -
Figura 3.118 Valores médios do $w_{max}$ do calcário após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde) .....	- 220 -



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Tipo de aplicações definidas em M/125 para os diversos tipos de materiais .....	21 -
Tabela 2.2 Requisitos mínimos a que o aterro de resíduos deve obedecer .....	24 -
Tabela 2.3 Valores-limite de lixiviação para os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes .....	25 -
Tabela 2.4 Valores-limite para o teor total de parâmetros orgânicos para os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes .....	25 -
Tabela 2.5 Requisitos mínimos para a permeabilidade e para a espessura da barreira passiva ...	27 -
Tabela 2.6 Elementos constituintes de um sistema de proteção basal ativo e respetivas considerações mais relevantes .....	28 -
Tabela 2.7 Elementos constituintes de um sistema de selagem final e respetivas considerações mais relevantes .....	29 -
Tabela 2.8 Principais elementos constituintes do sistema de drenagem e recolha de lixiviados ....	32 -
Tabela 2.9 Composição dos lixiviados .....	37 -
Tabela 2.10 Classificação de RCD em função da sua origem .....	42 -
Tabela 2.11 Estimativas da quantidade de RCD produzidos em função da sua origem.....	42 -
Tabela 2.12 Estimativa da composição dos RCD produzidos na Noruega em função da sua origem .....	43 -
Tabela 2.13 Classificação de RCD em função da sua composição .....	43 -
Tabela 2.14 Listagem dos constituintes de RCD, incluindo solos escavados de locais contaminados, pertencentes ao capítulo 17 da LER .....	44 -
Tabela 2.15 Classificação de RCD pela especificação LNEC E 473 .....	45 -
Tabela 2.16 Classificação de RCD pela especificação LNEC E 474 .....	45 -
Tabela 2.17 Estimativa da composição dos RCD produzidos em vários estados-membros da UE .....	46 -
Tabela 2.18 Quantidades e destino final dos RCD em vários estados-membros da UE .....	47 -
Tabela 2.19 Destino final dos RCD, em percentagem de massa, em Portugal .....	48 -
Tabela 2.20 Quadro resumo de alguns estudos realizados para a quantificação dos RCD produzidos em Portugal .....	49 -
Tabela 2.21 Quadro comparativo entre a produção de RCD observada em alguns municípios do Brasil e de Portugal .....	50 -
Tabela 2.22 Estimativas da quantidade de RCD produzidos na Europa .....	51 -
Tabela 2.23 Estimativa da quantidade de RCD produzidos nos 27 estados-membros da UE para 2004 e 2005 .....	52 -
Tabela 2.24 Valores da lixiviabilidade de amostras de $AB_{RCD}$ .....	53 -
Tabela 2.25 Composição química de amostras de $AB_{RCD}$ .....	55 -
Tabela 2.26 Composição mineralógica de amostras de $AB_{RCD}$ .....	57 -
Tabela 2.27 Propriedades físicas de amostras de $AB_{RCD}$ .....	59 -

Tabela 2.28 Comparação entre as propriedades de amostras de AB <sub>RCD</sub> e de granito.....	- 60 -
Tabela 2.29 Resultados dos ensaios de compactação Proctor com amostras de AB <sub>RCD</sub> .....	- 60 -
Tabela 2.30 Utilização de RCD-R em infraestruturas rodoviárias e obras geotécnicas .....	- 65 -
Tabela 2.31 Destino final dos RCD-R .....	- 65 -
Tabela 2.32 Composição química das escórias negra e branca .....	- 70 -
Tabela 2.33 Estimativas da produção de aço .....	- 72 -
Tabela 2.34 Valores da lixiviabilidade de amostras de escória de aciaria de FAE processadas.....	- 73 -
Tabela 2.35 Composição química de amostras de escórias de aciaria de FAE processadas em diferentes países .....	- 75 -
Tabela 2.36 Principais elementos químicos presentes na composição de amostras de ASIC da SN da Maia e do Seixal para 3 e 6 meses de maturação .....	- 76 -
Tabela 2.37 Composição mineralógica de amostras de escórias de aciaria de FAE processadas avaliada com recurso à técnica de DRX.....	- 77 -
Tabela 2.38 Comparação entre as propriedades de amostras de ASIC e de granito .....	- 79 -
Tabela 2.39 Processo de degradação dos materiais rochosos à escala geológica e à escala de engenharia .....	- 89 -
Tabela 2.40 Tensões exercidas nas rochas por processos de alteração física .....	- 91 -
Tabela 2.41 Casos históricos de rápida degradação de materiais rochosos .....	- 99 -
Tabela 2.42 Principais mecanismos de alteração dos materiais rochosos em algumas obras de engenharia .....	- 100 -
Tabela 2.43 Guia para a avaliação da qualidade de agregados naturais .....	- 103 -
Tabela 2.44 Classificação da durabilidade dos materiais rochosos com base no $I_d$ .....	- 104 -
Tabela 2.45 Fatores que condicionam a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios de DMA ..	- 104 -
Tabela 2.46 Condicionantes do procedimento laboratorial do ensaio de DMA .....	- 105 -
Tabela 2.47 Resultados dos ensaios realizados com amostras de basalto .....	- 106 -
Tabela 2.48 Resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica realizados com amostras de basalto .....	- 107 -
Tabela: 2.49 Resultados dos ensaios de DMA realizados com amostras de calcário .....	- 107 -
Tabela 2.50 Resultados dos ensaios de caracterização mecânica com amostras de calcário .....	- 108 -
Tabela 2.51 Resultados dos ensaios de DMA em função das formas dos provetes .....	- 110 -
Tabela 3.1 Registo do processo de amostragem do AB <sub>RCD</sub> .....	- 117 -
Tabela 3.2 Registo do processo de amostragem do ASIC .....	- 122 -
Tabela 3.3 Registo do processo de amostragem do basalto.....	- 126 -
Tabela 3.4 Registo do processo de amostragem do calcário .....	- 132 -
Tabela 3.5 Elementos constituintes do sistema de proteção basal do aterro de resíduos.....	- 133 -
Tabela 3.6 Composição e quantidade de resíduos depositados no aterro de resíduos.....	- 135 -
Tabela 3.7 Composição química do lixiviado do aterro de resíduos em 2003, 2005 e 2010 .....	- 136 -
Tabela 3.8 Registo do processo de amostragem do lixiviado.....	- 137 -
Tabela 3.9 Provetes observados no estudo macropetrográfico.....	- 140 -
Tabela 3.10 Características dos provetes utilizados no estudo macropetrográfico.....	- 142 -



Tabela 3.11 Laminas delgadas utilizadas no estudo micropetrográfico .....	- 144 -
Tabela 3.12 Provetes utilizados nos ensaios de caracterização física .....	- 147 -
Tabela 3.13 Resumo dos ensaios de DMA.....	- 153 -
Tabela 3.14 Análise petrográfica do AB <sub>RCD</sub> .....	- 164 -
Tabela 3.15 Análise petrográfica do ASIC .....	- 166 -
Tabela 3.16 Análise petrográfica do basalto.....	- 168 -
Tabela 3.17 Análise petrográfica do calcário .....	- 169 -
Tabela 3.18 Valores médios das propriedades físicas iniciais do AB <sub>RCD</sub> .....	- 170 -
Tabela 3.19 Valores das propriedades físicas de amostras de AB <sub>RCD</sub> obtidos na bibliografia consultada .....	- 171 -
Tabela 3.20 Classificação de Verhoef e Van de Wall (1998 <i>in</i> Gomes, 2001) para avaliar a qualidade dos agregados naturais .....	- 172 -
Tabela 3.21 Valores médios das propriedades físicas iniciais do ASIC .....	- 172 -
Tabela 3.22 Valores das propriedades físicas de amostras de escórias de aciaria de FAE processadas obtidos na bibliografia consultada.....	- 172 -
Tabela 3.23 Valores médios das propriedades físicas iniciais do basalto.....	- 174 -
Tabela 3.24 Valores de propriedades físicas de amostras de basalto obtidos na bibliografia consultada .....	- 174 -
Tabela 3.25 Valores médios das propriedades físicas iniciais do calcário .....	- 175 -
Tabela 3.26 Valores das propriedades físicas de amostras de calcário obtidos na bibliografia consultada .....	- 175 -
Tabela 3.27 Síntese de resultados dos ensaios de DMA com agregados naturais .....	- 195 -
Tabela 3.28 Análise das alterações macropetrográficas do AB <sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 197 -
Tabela 3.29 Análise das alterações macropetrográficas do AB <sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 198 -
Tabela 3.30 Análise das alterações micropetrográficas do AB <sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 199 -
Tabela 3.31 Análise das alterações micropetrográficas do AB <sub>RCD</sub> após o ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 200 -
Tabela 3.32 Análise das alterações macropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 201 -
Tabela 3.33 Análise das alterações macropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 202 -
Tabela 3.34 Análise das alterações micropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 203 -
Tabela 3.35 Análise das alterações micropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 204 -
Tabela 3.36 Análise das alterações macropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 206 -
	- xxiii -

Tabela 3.37 Análise das alterações macropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 207 -
Tabela 3.38 Análise das alterações micropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 208 -
Tabela 3.39 Análise das alterações micropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 209 -
Tabela 3.40 Análise das alterações macropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 211 -
Tabela 3.41 Análise das alterações macropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 212 -
Tabela 3.42 Análise das alterações micropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados em água .....	- 213 -
Tabela 3.43 Análise das alterações micropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados no lixiviado .....	- 214 -

## SIMBOLOGIA E ABREVIATÖES

### ***Maiúsculas***

€	- Euro
A	- Águia da rede de abastecimento público
A	- Massa seca inicial dos 10 provetes
C	- Massa seca dos 10 provetes após o segundo ciclo de desgaste
D	- Massa do tambor
I	- Imersão
$I_d$	- Índice de durabilidade
$I_{d1}$	- Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do primeiro ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio
$I_{d2}$	- Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do segundo ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio
$I_{d3}$	- Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do terceiro ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio
$I_{d4}$	- Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do quarto ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio
$I_{d5}$	- Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do quinto ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio
$I_{d6}$	- Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do sexto ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio
L	- Líquido
L	- Lixiviado
$M_1$	- Massa do provete seco
$M_2$	- Massa saturada do provete imerso
$M_3$	- Massa saturada do provete com as faces enxutas
$M_{VA}$	- Massa volúmica aparente
$M_{VR}$	- Massa volúmica real
$P_e$	- Porosidade
S	- Sólido

### ***Minúsculas***

art.º	- artigo
hab	- habitante
ibid.	- <i>ibidem</i>
k	- condutividade hidráulica
min	- minuto
nº	- número

<i>op. cit.</i>	- <i>opus citatum</i>
<i>p. ex.</i>	- por exemplo
<i>pop.</i>	- população
<i>rpm</i>	- rotações por minuto
<i>ton</i>	- tonelada
$W_{max}$	- teor máximo em água de absorção

### **Abreviações**

<i>ABF</i>	- Agregado Britado Fino
<i>ABG</i>	- Agregado Britado Grosso
<i>AB<sub>RCD</sub></i>	- Agregado de Betão britado
<i>AB<sub>RCD</sub>_DMA_A</i>	- Provete de AB <sub>RCD</sub> submetido ao ensaio de DMA realizado em água
<i>AB<sub>RCD</sub>_DMA_L</i>	- Provete de AB <sub>RCD</sub> submetido ao ensaio de DMA realizado no lixiviado
<i>AB<sub>RCD</sub>_DMA<sub>I</sub>_A</i>	- Provete de AB <sub>RCD</sub> submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão em água
<i>AB<sub>RCD</sub>_DMA<sub>I</sub>_L</i>	- Provete de AB <sub>RCD</sub> submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão no lixiviado
<i>AF</i>	- Alto-Forno
<i>AICCOPN</i>	- Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas
<i>Alt</i>	- sinais de Alteração
<i>ALT-MAT</i>	- <i>ALTernative MATerials in road construction</i>
<i>AML</i>	- Área Metropolitana de Lisboa
<i>ANR</i>	- Autoridade Nacional de Resíduos
<i>AOX</i>	- Compostos organo-halogenados adsorvíveis
<i>APA</i>	- Agência Portuguesa do Ambiente
<i>ARR</i>	- Autoridades Regionais de Resíduos
<i>ASCE</i>	- <i>American Society of Civil Engineers</i>
<i>ASIC</i>	- Agregados Siderúrgico Inerte para a Construção
<i>ASIC_DMA_A</i>	- Provete de ASIC submetido ao ensaio de DMA realizado em água
<i>ASIC_DMA_L</i>	- Provete de ASIC submetido ao ensaio de DMA realizado no lixiviado
<i>ASIC_DMA<sub>I</sub>_A</i>	- Provete de ASIC submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão em água
<i>ASIC_DMA<sub>I</sub>_L</i>	- Provete de ASIC submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão no lixiviado
<i>ASTM</i>	- <i>American Society for Testing Materials</i>
<i>Bas</i>	- Provete de Basalto
<i>Bas_DMA_A</i>	- Provete de basalto submetido ao ensaio de DMA realizado em água
<i>Bas_DMA_L</i>	- Provete de basalto submetido ao ensaio de DMA realizado no lixiviado
<i>Bas_DMA<sub>I</sub>_A</i>	- Provete de basalto submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão em água
<i>Bas_DMA<sub>I</sub>_I</i>	- Provete de basalto submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão no lixiviado
<i>BOF</i>	- <i>Basic Oxygen Furnace</i>
<i>BRV</i>	- <i>Österreichischer Baustoff-Recycling Verband</i>

<i>BS</i>	- <i>British Standards</i>
<i>BTEX</i>	- Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
<i>C&amp;DW</i>	- <i>Construction and Demolition Waste</i>
<i>C.E.</i>	- Condutividade Elétrica
<i>Cal</i>	- Calcite
<i>Cal</i>	- Provete de Calcário
<i>Cal_DMA_A</i>	- Provete de calcário submetido ao ensaio de DMA realizado em água
<i>Cal_DMA_L</i>	- Provete de calcário submetido ao ensaio de DMA realizado no lixiviado
<i>Cal_DMA_L_A</i>	- Provete de calcário submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão em água
<i>Cal_DMA_L_L</i>	- Provete de calcário submetido ao ensaio de DMA após prévia imersão no lixiviado
<i>CBO</i>	- Carência Bioquímica de Oxigénio
<i>CBO<sub>5</sub></i>	- Carência Bioquímica de Oxigénio a 5 dias
<i>CBR</i>	- <i>California Bearing Ration</i>
<i>CCP</i>	- Código dos Contratos Públicos
<i>CE</i>	- Comissão Europeia
<i>CEE</i>	- Comissão Económica Europeia
<i>CEN</i>	- <i>Comité Européen de Normalisation</i>
<i>CER</i>	- Catálogo Europeu de Resíduos
<i>CFC</i>	- CloroFluoro Carbonetos
<i>CIRVER</i>	- Centros Integrados de Recuperação, Valorização e Eliminação de Resíduos perigosos
<i>Cla</i>	- Clastos
<i>CNR</i>	- <i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i>
<i>CO</i>	- Conversor a Oxigénio
<i>COD</i>	- Carbono Orgânico Dissolvido
<i>COT</i>	- Carbono Orgânico Total
<i>COXs</i>	- Compostos Orgânicos Xenobióticos
<i>CQO</i>	- Carência Química de Oxigénio
<i>CWO</i>	- <i>Commercial Wastes Ordinance</i>
<i>DBB</i>	- Departamento de Barragens de Betão
<i>DCT</i>	- Departamento de Ciências da Terra
<i>DEPA</i>	- <i>Danish Environmental Protection Agency</i>
<i>DG</i>	- Departamento de Geologia
<i>DGMA</i>	- Direção Geral do Meio Ambiente
<i>DHA</i>	- Departamento de Hidráulica e Ambiente
<i>DIN</i>	- <i>Deutsches Institut fur Normung</i>
<i>DL</i>	- Decreto-Lei
<i>DMA</i>	- Desgaste em Meio Aquoso

<i>DPC</i>	- Diretiva dos Produtos de Construção
<i>DQR</i>	- Diretiva Quadro Resíduos
<i>DRX</i>	- Difração de Raios X
<i>EAF</i>	- <i>Electric Arc Furnance</i>
<i>EEA</i>	- <i>European Environment Agency</i>
<i>EEE</i>	- Espaço Económico Europeu
<i>EEEI</i>	- Elétricos e Equipamentos Eletrónicos
<i>e-GAR</i>	- Guia de Acompanhamento de Resíduos eletrónico
<i>Eh</i>	- Potencial Redox
<i>EN</i>	- <i>European Normalisation</i>
<i>EP</i>	- Estradas de Portugal
<i>EPA</i>	- <i>Environmental Protection Agency</i>
<i>EPD</i>	- <i>Environmental Protection Department</i>
<i>EPS</i>	- <i>Expandable PolyStyrene</i>
<i>ETAL</i>	- Estação de Tratamento de Águas Lixiviantes
<i>ETAR</i>	- Estação de Tratamento de Águas Residuais
<i>ETC/RWM</i>	- <i>European Topic Centre on Resource and Waste Management</i>
<i>EUA</i>	- Estados Unidos da América
<i>EUROSLAG</i>	- <i>EUROpean SLAG association</i>
<i>FAE</i>	- Forno de Arco Elétrico
<i>FC</i>	- Futebol Clube
<i>FCT</i>	- Faculdade de Ciências da Terra
<i>FCUL</i>	- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
<i>FIR</i>	- <i>Fédération Interationale du Recyclage</i>
<i>FRX</i>	- Fluorescência de Raios X
<i>GSEGWPR</i>	- <i>Geological Society Engineering Group Working Party Report</i>
<i>GTR</i>	- <i>Guide Technique pour les Remblais et couches de forme</i>
<i>HAP</i>	- Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
<i>I&amp;D</i>	- Investigação e Desenvolvimento
<i>I.P.</i>	- Instituto Público
<i>IBGE</i>	- <i>Institut Bruxellios pour la Gestion de l'Environnement</i>
<i>IBS</i>	- Instituto Brasileiro de Siderurgia
<i>IGE</i>	- Instituto Geográfico do Exército
<i>INE</i>	- Instituto Nacional de Estatística
<i>INETI</i>	- Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
<i>INR</i>	- Instituto dos Resíduos
<i>ISRM</i>	- <i>International Society for Rock Mechanics</i>
<i>IST</i>	- Instituto Superior Técnico
<i>JRC-IES</i>	- <i>Joint Research Center: Institute for Environment and Sustainability</i>

<i>LABES</i>	- LABoratório de Engenharia Sanitária
<i>LD</i>	- <i>Linz-Donawitz</i>
<i>LER</i>	- Lista Europeia de Resíduos
<i>LGAmb</i>	- Laboratório de Geotecnia Ambiental
<i>LMR</i>	- Laboratório de Mecânica das Rochas
<i>LNEC</i>	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<i>LNEG</i>	- Laboratório Nacional de Energia e Geologia
<i>Mc</i>	- Matriz cimentícia
<i>Mec.</i>	- Mecânicas
<i>Mo</i>	- Matéria orgânica
<i>MOD</i>	- Material Orgânico Dissolvido
<i>MOR</i>	- Mercado Organizado de Resíduos
<i>MWLA-BC</i>	- <i>Ministry of Water, Land and Air protection of British Columbia</i>
<i>N.A</i>	- Nível do meio aquoso no interior do recipiente em acrílico
<i>N.A.</i>	- Nada a Assinalar
<i>N//</i>	- Nicóis Paralelos
<i>NBR</i>	- Norma Brasileira Regulamentadora
<i>NCDWC</i>	- <i>National Construction and Demolition Waste Council</i>
<i>NES</i>	- Núcleo de Engenharia Sanitária
<i>NEWMOA</i>	- <i>Northeast Waste Management Officials Association</i>
<i>NFOS</i>	- Núcleo de Fundações e Obras Subterrâneas
<i>NiSA</i>	- <i>Nippon Slag Association</i>
<i>NP</i>	- Norma Portuguesa
<i>NSA</i>	- <i>National Slag Association</i>
<i>NX</i>	- Nicóis Cruzados
<i>NZS</i>	- <i>New Zealand Standards</i>
<i>OCDE</i>	- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
<i>OF</i>	- Óxidos de Ferro
<i>OH</i>	- <i>Open Heart</i>
<i>OI</i>	- Olivina
<i>OI_Alt</i>	- Olivina Alterada
<i>Ool</i>	- Oólito
<i>Opq</i>	- minerais Opacos
<i>PC</i>	- <i>Portland Cement</i>
<i>PCB</i>	- PoliCloroBifenilos 7 congéneres
<i>PCE</i>	- Parlamento e Concelho Europeus
<i>PE</i>	- PoliEtileno
<i>PEAD</i>	- PoliEtileno de Alta Densidade
<i>PERSU</i>	- Plano Estratégico sectorial de gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

<i>PET</i>	- Politereftalato de Etila
<i>PF</i>	- Perda ao Fogo
<i>Pfo</i>	- Partícula de ferro oxidada
<i>pH</i>	- potencial Hidrogeniónico
<i>Pl</i>	- Plagioclase
<i>PNRCD</i>	- <i>Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición</i>
<i>PPRU</i>	- Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos
<i>Prop.</i>	- Propriedades
<i>Pts</i>	- Poros
<i>Qtz</i>	- Quartzo
<i>RCA</i>	- <i>Recycled Concrete Aggregate</i>
<i>RCD</i>	- Resíduos de Construção e Demolição
<i>RCD-R</i>	- Resíduos de Construção e Demolição Reciclados
<i>REAGIR</i>	- Reciclagem de Entulho no Âmbito da Gestão Integrada de Resíduos
<i>REFER</i>	- REde FERroviária nacional
<i>RGGR</i>	- Regime Geral da Gestão de Resíduos
<i>RGPPGR</i>	- Regime Geral aplicável à Prevenção, Produção e Gestão de Resíduos
<i>RJUE</i>	- Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação
<i>RSU</i>	- Resíduos Sólidos Urbanos
<i>S.A.</i>	- Sociedade Anónima
<i>SAMARIS</i>	- <i>Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure</i>
<i>SDT</i>	- Sólidos Dissolvidos Totais
<i>SIRAPA</i>	- Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente
<i>SIRER</i>	- Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos
<i>SN</i>	- Siderurgia Nacional Empresa de Produtos Longos, S.A.
<i>SST</i>	- Sólidos Suspensos Totais
<i>SWMP</i>	- <i>Site Waste Managment Plan</i>
<i>TGR</i>	- Taxa de Gestão de Resíduos
<i>TR</i>	- <i>Technical Reports</i>
<i>UBA</i>	- <i>UmweltBundesAmt</i>
<i>UE</i>	- União Europeia
<i>UNE</i>	- <i>Una Norma Española</i>
<i>UNISINOS</i>	- UNiversidade do vale do rio dos SINOS
<i>UNL</i>	- Universidade Noval de Lisboa
<i>Vd</i>	- Vidro da lâmina delgada
<i>W</i>	- material de cor branca precipitado no corpo do provete ASIC_DMA <sub>L</sub> _A
<i>WBCSD</i>	- <i>Word Business Council for Sustainable Development</i>
<i>WCD</i>	- <i>Waste Centre Denmark</i>
<i>X</i>	- espécie mineral não identificada



# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - Justificação do tema e enquadramento

A exploração de agregados naturais é hoje em dia encarada como um processo com significativas repercussões ambientais devidas, em grande parte, ao grande volume de material extraído, com consequente diminuição de recursos naturais não renováveis, às alterações significativas da morfologia dos terrenos e à necessidade por procurar e explorar de novos locais de extração. Como exemplo do exposto, refira-se que na Europa se extraem cerca de 15 toneladas - ton, de minerais e minérios por habitante - hab, e por ano, das quais cerca de dois terços são rochas industriais e ornamentais (Fortunato *et al.*, 2009).

A par da situação apresentada surgem os problemas inerentes à gestão dos escombros e dos finos produzidos na indústria extrativa. O grande volume de resíduos gerados nesta atividade, bem como nas mais diversas atividades domésticas, agrícolas, comerciais e industriais, associado à falta de medidas para promover a valorização dos mesmos, também têm vindo a contribuir para o atual estado de degradação do meio ambiente e para o agravamento dos riscos para a saúde pública, panorama que a sociedade atual pretende inverter através da implementação de políticas de desenvolvimento sustentável.

Neste sentido, um número crescente de países tem vindo a contemplar nas suas disposições legais, relacionadas com a atividade extrativa, políticas ativas de proteção do meio ambiente e, ao mesmo tempo, a incentivar a reciclagem dos resíduos como agregados reciclados alternativos aos agregados naturais, desde que os primeiros também garantam um comportamento adequado às obras de engenharia civil ao longo do seu tempo de vida útil.

Em matéria de gestão integrada de resíduos, numa perspetiva da sua reciclagem futura, a Diretiva 75/442/CEE - Comissão Económica Europeia, de 15 de julho, foi um marco. Aproximou as diferentes legislações nacionais dos vários estados-membros que à data integravam a União Europeia - UE, e teve como objetivos proteger o meio ambiente e o homem, e favorecer a recuperação de resíduos e a utilização de agregados reciclados (Freire, 2011).

Em Portugal, o quadro jurídico da gestão de resíduos foi pela primeira vez estabelecido em 1985, com a publicação do Decreto-Lei - DL, número - nº 488/85, a 25 de novembro. Como resultado e de acordo com aquele DL, foram lançadas as bases para um sistema de registo obrigatório de resíduos e para a definição de competências e responsabilidades no domínio da gestão dos mesmos. Atualmente vigora o DL nº 73/2011, de 17 de junho, que estabeleceu o Regime Geral aplicável à Prevenção, Produção e Gestão de Resíduos - RGPPGR. De entre as alterações introduzidas por este diploma ao Regime Geral da Gestão de Resíduos - RGGR, previsto no diploma anterior, o DL nº 178/2006 de 5 de setembro, salienta-se a prioridade ao fomento da reutilização e da reciclagem dos resíduos com vista a prolongar o seu uso na economia. Para a concretização deste objetivo, estabeleceram-se requisitos para que substâncias ou materiais resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos, e critérios para que determinados resíduos

deixem de ter o estatuto de resíduo, e definiram-se metas de utilização, com 5% de materiais reciclados a deverem ser utilizados em empreitadas de obras públicas.

Os Resíduos de Construção e Demolição - RCD, um dos dois resíduos a reciclar estudados nesta dissertação, são uma das alternativas possíveis aos agregados naturais na indústria da construção. A sua produção anual é significativa comparativamente à dos restantes resíduos, quer se trate de Portugal, quer se tratem dos estados-membros da UE, onde os valores globais estimados são, respetivamente,  $7,5 \times 10^6$  ton e  $100 \times 10^6$  ton.

Para além do exposto, o fluxo dos RCD apresenta outras particularidades que dificultam a sua gestão, razão que, entre outras, evidencia a necessidade de criar um regime jurídico próprio, estabelecendo normas técnicas relativas às operações de gestão de RCD. O enquadramento legal com esse fim ficou consagrado, em Portugal, com a publicação do DL n.º 46/2008, de 12 de março. No âmbito deste diploma foram publicadas quatro especificações pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, direcionadas para a reciclagem de RCD em betões de ligantes hidráulicos (LNEC E 471 (2009)), em misturas betuminosas a quente em central (LNEC E 472 (2009)), em camadas não ligadas de pavimentos (LNEC E 473 (2009)) e em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte (LNEC E 474 (2009)).

No caso das escórias de aciaria de Forno de Arco Elétrico - FAE, o segundo resíduo a reciclar estudado, a Siderurgia Nacional Empresa de Produtos Longos, S.A. - SN, prevê que a produção anual deste resíduo em Portugal ronde, a médio prazo, as  $400 \times 10^3$  ton. Contudo, contrariamente ao que se verifica para os RCD, em Portugal, não existe qualquer tipo de legislação específica, pelo que, neste caso, as operações de gestão das escórias de aciaria de FAE são reguladas em concordância com o previsto pelo RGPPGR.

Conforme mencionado por Roque *et al.* (2010), a reciclagem dos resíduos em obras geotécnicas deve ser acompanhada de um estudo das suas propriedades ambientais e de engenharia. Comprovando-se que não é relevante o seu potencial poluente para o meio ambiente e para a saúde pública, não há razão para que esses materiais alternativos não possam ser aplicados em obra, se estiver garantido um comportamento mecânico adequado destas ao longo do seu tempo de vida útil. Segundo os mesmos autores e nestas condições, ou seja, de adequação ambiental e mecânica dos materiais alternativos para utilização em obra, deve-se mesmo privilegiar, no quadro de uma política de construção sustentável e de gestão de recursos adequada, a sua utilização em detrimento da dos materiais naturais.

Na ausência de legislação específica para a classificação da perigosidade ambiental dos resíduos em obras geotécnicas, a sua reciclagem vem sendo permitida desde que pertencentes à categoria dos resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, em conformidade com os requisitos mínimos previstos no DL n.º 183/2009, de 10 de agosto, por se admitir que verificadas estas condições não existe risco para o meio ambiente e para a saúde pública. As especificações LNEC para os RCD preveem um controlo ambiental destes materiais, segundo os requisitos do diploma anteriormente indicado, com a frequência mínima de duas vezes por ano. No que se refere às escórias de aciaria de FAE, os estudos já realizados por Roque *et al.* (*ibid.*) mostraram tratar-se de um resíduo admissível em aterros para resíduos inertes. No âmbito desse estudo, onde se avaliou a

perigosidade ambiental das escórias de aciaria, foi evidenciada a sua adequabilidade mecânica para a construção de camadas não ligadas de pavimentos e de aterros estruturais de infraestruturas rodoviárias (Gomes Correia *et al.*, 2012). Um estudo semelhante ao realizado com as escórias de aciaria, mas ainda numa fase inicial, é referido em Freire *et al.* (2011) para os RCD, tendo em vista a sua reciclagem em camadas não ligadas de pavimentos rodoviários.

Nos estudos referidos no parágrafo anterior, privilegiou-se a reciclagem dos dois resíduos em obras rodoviárias, em particular em duas aplicações específicas: camadas de pavimento e de aterro. No entanto, na avaliação das propriedades dos resíduos não foi abordado o estudo da durabilidade. É neste contexto que na presente dissertação se estuda a durabilidade dos RCD e das escórias de aciaria de FAE e se avalia a viabilidade técnica da sua reciclagem em estruturas de drenagem de infraestruturas de transporte e de obras geotécnicas.

No que respeita à durabilidade dos resíduos a reciclar, entende-se que a mesma é fundamental para garantir o adequado funcionamento das obras ao longo do seu tempo de vida útil, à semelhança do já reconhecido com a utilização dos agregados naturais em estudos desenvolvidos por Quinta Ferreira (1990) e por Jeremias (1991). Acresce que na bibliografia consultada, designadamente na internacional, não se identificaram estudos sobre a durabilidade dos agregados reciclados em geral, e dos resultantes do processamento dos RCD e das escórias de aciaria de FAE em particular, explicável pelo facto da utilização deste tipo de agregados em obra ainda ser uma aplicação relativamente recente, contrariamente ao verificado com os agregados naturais. Entende-se, por isso, que o presente trabalho não só contribuirá para avaliar a durabilidade dos dois agregados reciclados, para os quais se perspetiva uma crescente utilização em obras de engenharia civil, como terá relevância internacional.

Em relação à aplicação dos resíduos em estruturas de drenagem, privilegiou-se a sua utilização na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de proteção basal dos aterros de resíduos. O elevado volume de material que pode ser reciclado na construção desta camada e o número de aterros de resíduos que vão continuar a ser construídos ou ampliados em Portugal justificam o estudo da durabilidade dos RCD e das escórias de aciaria de FAE aos lixiviados. Atendendo, porém, a que se utilizou água como segundo meio aquoso, os resultados obtidos permitirão também avaliar sobre a aplicabilidade dos dois resíduos selecionados em estruturas de drenagem de outras obras geotécnicas que estejam preferencialmente em contacto com aquele meio.

Por último, refira-se que o estudo apresentado nesta dissertação será complementado por um outro, a desenvolver no âmbito de outra dissertação, cujo objetivo principal será a avaliação do comportamento hidráulico dos dois resíduos a longo prazo, através da realização de ensaios de permeabilidade.

## 1.2 - Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação reside na avaliação da suscetibilidade à degradação de dois agregados reciclados, o Agregado de Betão britado -  $AB_{RCD}$ , e o Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção - ASIC, resultantes do processamento de dois resíduos, respetivamente, de RCD e de escórias de aciaria de FAE, tendo em vista a sua utilização na construção de estruturas de drenagem de infraestruturas de transporte e de obras geotécnicas, em particular na camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de proteção basal dos aterros de resíduos. Esta é a razão pela qual os ensaios de avaliação da durabilidade dos dois agregados reciclados foram realizados com água, recolhida na rede de abastecimento público, e com um lixiviado, recolhido num aterro de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU.

O mesmo programa experimental realizado com os agregados reciclados foi aplicado a dois agregados naturais, um de basalto, e um outro de calcário, com o objetivo de comparar os resultados obtidos. A relevância desta comparação resulta da falta de dados na bibliografia consultada sobre a durabilidade dos agregados reciclados selecionados e de estes existirem para os dois agregados naturais acima indicados.

Ao exposto, acresce que, de acordo com o DL nº 183/2009, o material a integrar na camada drenante dos aterros de resíduos deve ser isento de material calcário devido à possível dissolução do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). Assim, complementarmente ao objetivo principal, também se pretende avaliar a durabilidade do calcário em presença do lixiviado.

## 1.3 - Metodologia de estudo

Para o cumprimento dos objetivos expostos na secção anterior, adotou-se a seguinte metodologia: recolha e análise bibliográfica; definição de critérios para a seleção dos materiais e dos locais para a sua amostragem; elaboração do plano para a recolha das amostras; e seleção e programação dos ensaios a realizar em laboratório.

A avaliação da durabilidade do  $AB_{RCD}$ , do ASIC, do basalto e do calcário foi efetuada mediante a realização de ensaios de Desgaste em Meio Aquoso - DMA, conforme previsto no “*Suggested method for determination of the slake-durability index*” da *International Society for Rock Mechanics - ISRM* (1977). Porém, com o objetivo de simular condições químicas e mecânicas mais agressivas e prolongadas do que as previstas no método, procedeu-se a algumas alterações.

Com efeito, para cada material começou-se por preparar quatro conjuntos de provetes idênticos. Em todos os conjuntos, aos dois ciclos de desgaste do ensaio de DMA recomendados pelo método, de 10 minutos - min, cada um e à velocidade constante de 20 rotações por minuto - rpm, efetuou-se um terceiro ciclo de desgaste com a duração de 30 min (600 rotações, no total), pretendendo-se com este último ciclo, submeter os materiais a ações mecânicas mais prolongadas. Dois conjuntos de cada material foram ensaiados em água e os restantes dois no lixiviado.

O potencial Hidrogeniónico - pH, do lixiviado no momento da recolha no aterro de resíduos era de 7,6. Em laboratório foi acidificado com ácido clorídrico (HCl) até se atingir um pH de 5,5. Com esta acidificação pretendeu-se criar condições químicas mais agressivas que as normalmente observadas nos aterros de RSU.

Em cada material ensaiado houve, também, um conjunto que previamente ao ensaio de DMA foi imerso em água e um outro no lixiviado, por um período de tempo de 15 dias. Com esta imersão prévia pretendeu-se prolongar o tempo de contato dos materiais com o meio aquoso do ensaio.

Paralelamente aos ensaios de DMA procedeu-se, antes e após a sua realização, à análise macro e micropetrográfica e à caracterização física (massa volúmica real -  $M_{VR}$  e massa volúmica aparente -  $M_{VA}$ , porosidade efetiva -  $P_e$ , e teor máximo em água de absorção -  $w_{max}$ ) dos quatro materiais estudados. Estes ensaios decorreram com o objetivo de avaliar a ocorrência e a respetiva expressão de alterações nos materiais após os ensaios de DMA.

Durante a realização dos ensaios de DMA e da imersão dos provetes dos quatro materiais na água e no lixiviado procedeu-se, também, ao controlo do pH, do potencial redox - Eh, e da Condutividade Elétrica - C.E., daqueles meios aquoso. Este procedimento teve por objetivo acompanhar as alterações naqueles parâmetros ao longo da fase de contato entre os materiais e os meios aquosos, e de servir de meio de diagnóstico auxiliar na análise do comportamento dos materiais.

## 1.4 - Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por quatro capítulos, agrupados em duas partes. À primeira pertencem os capítulos 1 e 2, nos quais se procede ao enquadramento das principais temáticas tratadas nesta dissertação, ao passo que a segunda é composta pelos capítulos 3 e 4, nos quais se apresentam e se analisam os resultados obtidos no estudo experimental realizado e se conclui sobre os mesmos.

O capítulo 1 é designado “Introdução”. Neste, primeiramente, é feita uma breve justificação sobre a temática da presente dissertação, assim como o seu enquadramento. De seguida faz-se a descrição dos objetivos a alcançar com o estudo realizado e a metodologia adotada para o cumprimento dos mesmos. Finalmente é dado a conhecer o conteúdo de cada um dos capítulos que compõem o presente documento.

No capítulo 2, denominado “Revisão da Literatura”, são tratadas cinco temáticas distintas:

- i. quadro legal sobre resíduos;
- ii. regulamentação técnica sobre agregados reciclados;
- iii. caracterização dos aterros de resíduos e particularidades da camada de drenagem e recolha dos lixiviados;
- iv. aspetos relevantes sobre os dois resíduos selecionados, os RCD e as escórias de aciaria de FAE; e
- v. durabilidade dos materiais.

Com efeito, começa-se por abordar o atual quadro legal e regulamentar em matéria de resíduos sólidos, salientando o caso dos RCD e das escórias de aciaria de FAE. Para ambos, é abordada a situação vigente a nível nacional e internacional.

Posteriormente, caracterizam-se os aterros de resíduos e, em particular a camada de drenagem e recolha dos lixiviados, visto tratar-se de uma das aplicações preferenciais para reciclar os dois tipos de resíduos em estudo. São abordados diversos temas como o quadro legal relativo à deposição de resíduos em aterro, as componentes estruturais de um aterro de resíduos, com especial ênfase para a camada de drenagem e recolha dos lixiviados, e a produção e as características dos lixiviados.

Tratada a temática “Caracterização dos aterros de resíduos e particularidades da camada de drenagem e recolha dos lixiviados”, apresentam-se os aspetos mais relevantes sobre os dois resíduos selecionados. Em ambos os casos, a informação apresentada encontra-se estruturada do seguinte modo: origem; classificação; produção a nível nacional e internacional; caracterização ambiental, química e mineralógica, e geométrica, física e mecânica; e, por último, valorização dos respetivos resíduos dentro e fora do âmbito da aplicação abordada nesta dissertação.

O capítulo termina com a abordagem da “Durabilidade dos materiais”. Nesta secção são dados a conhecer algumas definições fundamentais no âmbito da temática em questão e descritos os principais mecanismos de alteração física e química, alguns dos efeitos correntemente identificados no comportamento das rochas quando alteradas e os métodos de avaliação da durabilidade, com especial destaque para o ensaio de DMA. A secção termina com a apresentação de alguns casos de estudo de avaliação da durabilidade de agregados de natureza basáltica e calcária. Como referido na secção 1.2, não se encontraram na bibliografia consultada estudos sobre a durabilidade dos agregados reciclados selecionados.

No capítulo 3, intitulado “Estudo Experimental”, começa-se por apresentar os quatro materiais em estudo, designadamente o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC, o basalto e o calcário, estes dois últimos extraídos em pedreiras, assim como o lixiviado recolhido de um aterro de RSU, um dos meios aquosos utilizados nos ensaios de DMA (o outro meio, conforme referido na secção 1.1, foi a água da rede de abastecimento público). Em relação aos quatro primeiros, os temas tratados são os seguintes: localização geográfica, enquadramento geológico (apenas se aplica ao basalto e ao calcário), processamento e amostragem. Relativamente ao lixiviado, a par da localização geográfica do aterro de RSU onde se procedeu à sua recolha, trata-se ainda das características do aterro, dos resíduos depositados e do lixiviado recolhido, e descreve-se o procedimento de amostragem.

Em seguida expõe-se a metodologia adotada para a caracterização laboratorial dos materiais amostrados, onde se incluem: a análise macro e micropetrográfica, a caracterização física ( $M_{VR}$ ,  $M_{VA}$ ,  $P_e$  e  $w_{max}$ ) e a durabilidade. Para cada um dos ensaios apresenta-se e descreve-se o respetivo equipamento. O capítulo 3 termina com a apresentação dos resultados obtidos a partir da realização dos ensaios atrás referidos e respetivas análises e conclusões.

No capítulo 4, designado “Considerações finais e desenvolvimentos futuros”, expõem-se as principais conclusões do estudo desenvolvido e apresentam-se algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

Em “Anexo”, apresenta-se o conteúdo de alguns artigos do DL nº 73/2011, nomeadamente a definição de alguns termos, os princípios gerais da gestão de resíduos, a definição de “subproduto” e de “fim de estatuto de resíduo”, as taxas inerentes ao processo de gestão de resíduos e os princípios do mercado de resíduos. Resumem-se também os principais documentos legislativos em matéria de resíduos aprovados em Portugal nos últimos anos, assim como as principais medidas implementadas em relação à gestão de RCD e de escórias de aciaria de FAE em vários estados-membros da UE.





## 2 - REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 - Enquadramento das políticas de gestão integrada de resíduos

#### 2.1.1 - Considerações gerais

O grande volume de resíduos provenientes das mais diversas atividades industriais e a falta de medidas que promovam a sua valorização contribuíram, em certa medida, para o atual estado de degradação do meio ambiente, panorama que se pretende inverter com a adoção de políticas e medidas que promovam um desenvolvimento mais sustentável. Com o surgimento de legislação relacionada com a gestão de resíduos, designadamente no que respeita à sua produção, ao seu armazenamento, ao seu transporte, à sua valorização e ao seu destino final, pretendeu-se assim pôr termo a um período caracterizado por uma atitude de aparente despreocupação com as questões ambientais e de saúde pública.

Com a publicação da Diretiva 75/442/CEE foram dados os primeiros passos na aproximação das diversas legislações nacionais em vigor nos vários estados-membros da UE (Mália, 2010) tendo como premissa proteger o meio ambiente e a saúde pública, e favorecer a recuperação dos resíduos, designadamente através da sua reciclagem (Freire, 2011). Em Portugal, o primeiro documento legislativo em matéria de resíduos surgiu em 1985, com a publicação do DL nº 488/85. Deste então, a sucessiva introdução de novos documentos legislativos a nível nacional refletiu-se nas políticas de ordenamento do território, e na organização e no funcionamento do setor económico, influenciando, posteriormente, o quotidiano das empresas e da sociedade em geral (Sousa e Monteiro, 2009).

De facto, as diversas restrições legais à produção e ao processamento de resíduos favoreceram o aparecimento de novas tecnologias, o desenvolvimento da ciência e a reorganização empresarial, potenciando o surgimento de novas oportunidades de negócio na área da gestão de resíduos (*ibid.*). Com a publicação do DL nº 178/2006 estabeleceu-se o RGGR, passando as entidades produtoras de resíduos a serem responsáveis pela sua gestão e obrigadas a cumprir com as imposições definidas pela hierarquia da gestão de resíduos (*ibid.*). Ficou definido que após a utilização de um bem era importante privilegiar a sua reutilização, a sua reciclagem ou valorizá-lo mediante outras formas, e, só em último caso, proceder à sua eliminação (*ibid.*).

Atualmente são correntes as campanhas de sensibilização junto das entidades produtoras de resíduos, com o principal objetivo destas minimizarem o impacte ambiental resultante das suas atividades, que é cada vez mais sentido e menos tolerado pela sociedade. Por este motivo, a reutilização e a reciclagem de resíduos representa um desafio, não só pela necessidade de se realizar estudos prévios com o intuito de valorizá-los em futuros casos de obra, mas também pela motivação assente nas restrições orçamentais e preocupações ambientais atuais.

Na presente secção aborda-se, de um modo genérico, o quadro legal em vigor em Portugal sobre gestão de resíduos e, de modo mais particular os instrumentos legais nacionais e internacionais relacionados com a valorização dos RCD e das escórias de aciaria de FAE. Na secção

2.1.2 apresenta-se o atual RGPPGR, definido com a publicação do DL nº 73/2011, destacando alguns pontos essenciais, como as definições de alguns termos técnicos e os princípios gerais da gestão de resíduos, e algumas alterações impostas em relação ao DL nº 178/2006. Por último, nas secções 2.1.3.1 e 2.1.3.2, atendendo aos resíduos seleccionados, é abordado, respetivamente, o atual regime jurídico específico aplicável aos RCD e às escórias de aciaria de FAE a nível nacional e internacional.

## **2.1.2 - Enquadramento geral**

Com a publicação do DL nº 488/85 pretendia-se criar uma estratégia que visasse incentivar uma menor produção de resíduos, acompanhada do desenvolvimento de processos tecnológicos que permitissem, em primeira instância, a reciclagem dos resíduos produzidos. A eliminação destes só deveria ser considerada nos casos em que os resíduos não pudessem ser reciclados em condições de máximo aproveitamento do seu potencial energético (Mália, 2010). A evolução do direito comunitário determinou a revogação daquele diploma pelo DL nº 310/95, de 20 de novembro, revogado posteriormente pelo DL nº 239/97, de 9 de setembro. Com este último, estabeleceram-se as regras gerais para uma correta gestão de resíduos (*ibid.*). Entretanto, desde 2006, encontrava-se em vigor o DL nº 178/2006, do qual resultou a aprovação do RGGR, que transpôs para o ordenamento jurídico interno a Diretiva 2006/12/CE - Comissão Europeia, de 5 de abril, e a Diretiva 91/698/CEE, de 12 de dezembro (Chaves, 2009; Simão e Borges, 2009; Freire, 2011).

No seguimento do estipulado na Diretiva 2008/98/CE, Diretiva Quadro Resíduos - DQR, foi publicado o DL nº 73/2011 que, de acordo com o descrito no mesmo, procedeu à terceira alteração ao DL nº 178/2006, e transpôs a DQR publicada pelos Parlamento e Conselho Europeus - PCE. De referir que com a publicação da Diretiva 2008/98/CE, observou-se uma mudança acentuada na linha de pensamento seguida até então pelos estados-membros da UE, ao passar-se de uma política focalizada na opção por eliminar resíduos para uma que privilegiasse o seu uso como subprodutos, tendo presente a preservação dos recursos naturais (Mália, *op. cit.*). Esta procedeu à clarificação de alguns conceitos-chave, como os casos de “resíduo”, de “valorização” e de “eliminação”, ao reforço de medidas a cumprir por parte dos estados-membros da UE em matéria de prevenção de resíduos, mediante uma abordagem baseada no ciclo de vida dos resíduos, e, ainda, ao reforço da importância que uma correta redução dos impactes ambientais decorrentes da produção e gestão de resíduos representa em termos económicos (Simão e Borges, *op. cit.*).

Com o DL nº 73/2011 foi estabelecido o RGPPGR, conforme referido na secção 1.1, sendo este “(...) aplicável às operações de gestão de resíduos destinadas a prevenir ou reduzir a produção de resíduos, o seu carácter nocivo e os impactes adversos decorrentes da sua produção e gestão, bem como a diminuição dos impactes associados à utilização dos recursos, de forma a melhorar a eficiência da sua utilização e a proteção do ambiente e da saúde humana”. Como linha de pensamento para a sua definição manteve-se a filosofia dos “quatro R”, que, segundo Sousa e Monteiro (2009), foi tida como base para a definição do RGGR: “reduzir” a quantidade de resíduos produzidos; “reutilizar” os resíduos, quando não for possível reduzir a sua produção através da

utilização de materiais usados; “reciclar” os materiais não reutilizáveis, mediante uma prévia separação seletiva; e “recuperar”, quando possível, a energia dos resíduos que não podem ser reduzidos, reutilizados ou reciclados (Almeida, 2011).

Por meio da publicação do DL nº 73/2011 introduziram-se algumas alterações em relação ao RGGR que resultaram da necessidade de se “(...) reforçar a prevenção da produção de resíduos e de fomentar a sua reutilização e reciclagem numa perspetiva de prolongar o seu uso na economia (...)” antes de os repor em condições adequadas no meio natural, mas também, por se considerar fundamental promover o total aproveitamento do “(...) novo mercado organizado de resíduos como forma de consolidar a valorização dos resíduos, com vantagens para os agentes económicos (...)” e de “(...) estimular o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização” (DL nº 73/2011). Na prática, com o referido diploma:

- i. clarificaram-se alguns conceitos importantes como os casos de “resíduo”, “prevenção”, “reutilização”, “preparação para a reutilização”, “tratamento” e “reciclagem”, que, contribuindo para uma contínua atualização do regime jurídico de gestão de resíduos, visam melhorar o sistema de prevenção e gestão dos mesmos;
- ii. incentivou-se a opção pela recolha seletiva de resíduos e o estabelecimento de um regulamento que permitisse a livre comercialização de compostos para a valorização, sempre que determinados fluxos de resíduos não se enquadrassem com as diretrizes definidas pela hierarquia da gestão de resíduos, quer por razões de exequibilidade técnicas, quer por razões económicas ou ambientais;
- iii. aprovaram-se programas de prevenção e definiu as metas a cumprir até 2020, visando a preservação dos recursos naturais e a reutilização, a reciclagem e outras formas de valorização de resíduos, designadamente com a previsão de utilização “(...) de pelo menos 5% de materiais reciclados em empreitadas de obras públicas”;
- iv. alargou-se o mercado de resíduos aos subprodutos, aos materiais reciclados e aos resíduos perigosos, conferindo-lhe uma maior versatilidade e a possibilidade de funcionar como potenciador para a valorização de outros tipos de resíduos;
- v. distinguiram-se as operações de “armazenamento preliminar de resíduos antes da recolha” e de “armazenamento antes do tratamento”, com as empresas e/ou os estabelecimentos a não estarem sujeitos ao licenciamento durante o armazenamento de resíduos antes da sua recolha, e à inclusão de medidas administrativas simplistas, com isenção de licenciamento de um conjunto de atividades específicas de valorização de resíduos;
- vi. introduziram-se mecanismos de controlo após o licenciamento, com vista a ganhos de eficiência e maior celeridade no licenciamento das atividades de tratamento de resíduos;
- vii. definiram-se requisitos com vista a integrar algumas substâncias ou materiais, resultantes de um processo produtivo, na categoria dos subprodutos, e estabeleceu “(...) critérios para que determinados resíduos deixem de ter o estatuto de resíduos (...)”;
- viii. introduziram-se mecanismos com vista ao alargamento da responsabilidade do produtor tendo em conta o “(...) ciclo de vida dos materiais e não apenas a fase de fim de vida (...)”

com inerentes vantagens do ponto de vista da utilização eficiente dos recursos e do impacte ambiental”;

- ix. o transporte de resíduos passou a ser acompanhado pelo "(...) Guia de Acompanhamento de Resíduos eletrónico - e-GAR, (...)", simplificando desta forma, o procedimento de registo e controlo da informação relativa a tal atividade; e
- x. passou a ser obrigatório o registo, no Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente - SIRAPA, da produção e gestão de resíduos, e dos produtos colocados à venda que, no final da sua vida, dessem origem a resíduos, com regras de gestão específicas.

No que respeita aos artigos constantes no DL n.º 73/2011, destacam-se os considerados mais relevantes, tendo em conta as temáticas abordadas na presente dissertação, como por exemplo - p. ex.: o artigo - art.º 3, que trata de alguns termos técnicos importantes como os casos de “resíduo”, “resíduo inerte”, “reutilização”, “reciclagem” e “valorização” (Anexo I e Anexo II); e os art.ºs 4 a 10, por definirem os “princípios gerais da gestão de resíduos” (Anexo III). Em relação a estes últimos, é de salientar o princípio da autossuficiência e da proximidade (art.º 4), da responsabilidade pela gestão (art.º 5), da hierarquia dos resíduos (art.º 7) e da regulação da gestão de resíduos (art.º 9), que em termos operacionais, se traduzem, respetivamente: no envio de resíduos para entidades licenciadas para a sua gestão que deve ser realizada em território nacional e com recurso a tecnologias e métodos apropriados para assegurar um nível elevado de proteção do meio ambiente e da saúde pública; na responsabilização do produtor pela gestão dos resíduos por si produzidos, passando a responsabilidade a recair para o detentor de resíduos apenas nos casos em que é impossível a identificação dos produtores dos mesmos; na execução da hierarquia dos resíduos, segundo a qual, no caso de ser impossível evitar a produção de resíduos, a valorização destes será a mais correta opção de gestão de resíduos visando o uso sustentável dos recursos naturais (figura 2.1); e no licenciamento das operações de gestão de resíduos, sendo proibida a realização de operações de tratamento de resíduos não licenciadas nos termos do DL n.º 73/2011, assim como o abandono de resíduos, a incineração de resíduos no mar e a injeção de resíduos no solo.



**Figura 2.1** Hierarquia da gestão de resíduos adotada pela UE e seguida por Portugal

A par do conjunto de artigos abordados, há ainda a referir o art.º 44-A e o art.º 44-B, que definem, respetivamente, “subproduto” e “fim do estatuto de resíduo” (Anexo IV), assim como os art.ºs

52 a 60 (Anexo V) e os art.<sup>os</sup> 61 a 65 (Anexo VI) que estabelecem dois importantes instrumentos económico-financeiros destinados à promoção da valorização de resíduos, a Taxa de Gestão de Resíduos - TGR, e o Mercado Organizado de Resíduos - MOR, respetivamente.

A TGR, introduzida pela primeira vez pelo RGGR, visa orientar o comportamento dos operadores económicos e dos consumidores, no sentido de reduzir a produção de resíduos e aumentar a eficácia do seu processamento (Simão e Borges, 2009). Contudo, de acordo com Fortunato *et al.* (2009), é ainda um instrumento deficitário na promoção da valorização dos RCD, considerando que a taxa para a deposição destes resíduos em aterros é inferior à taxa para a deposição de outros resíduos inertes. No RGPPGR a taxa aplicada aos resíduos que resultem de produtos introduzidos no mercado e que tenham como destino final a deposição em aterro é de 2,0 €/ton, ao passo que a taxa aplicada a outros resíduos inertes depositados em aterro é de 5,0 €/ton (Chaves, 2009).

A criação do MOR teve como propósito facilitar e fomentar as trocas comerciais de resíduos, potenciando a reutilização ou a valorização destes através da sua “(...) reintrodução no circuito económico” (Simão e Borges, *op. cit.*). Os mesmos autores referem, ainda, que este tipo de mercado constitui um “(...) instrumento económico de índole voluntária (...)” com o qual se pretende centralizar as transações de todo o tipo de resíduos num só espaço, de forma a potenciar o valor comercial dos mesmos, eliminar custos de transação, diminuir a procura de matérias-primas naturais e contribuir para a “(...) modernização tecnológica dos respetivos produtores”. Neste mercado, cujo funcionamento depende de uma autorização a conceder por parte da Agência Portuguesa do Ambiente - APA (Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas - AICCOPN, 2009 *in* Chaves, *op. cit.*), podem ser transacionados todos os resíduos catalogados na Lista Europeia de Resíduos - LER, à exceção dos pertencentes à categoria de perigosos, visando unicamente a sua valorização (Chaves, *op. cit.*). Não obstante o exposto, Fortunato *et al.* (*op. cit.*) salientam que, no caso dos RCD, há dificuldade em introduzi-los na indústria da construção face aos preços praticados pelas matérias-primas naturais, à insuficiente informação relativa ao seu desempenho como material de construção, particularmente a longo prazo, e à pouca receptividade por parte das empresas em utilizá-los como material de construção.

No Anexo VII da presente dissertação resumem-se os principais documentos legislativos sobre resíduos aprovados em Portugal nos últimos anos, sendo esta informação adaptada de Lourenço (2007) e atualizada até ao presente. Dos documentos apresentados destaca-se a Portaria nº 209/2004, de 3 de março, que inclui a LER. Esta lista veio substituir o Catálogo Europeu de Resíduos - CER, e classifica os resíduos em 20 capítulos, nos quais se incluem os RCD e as escórias de aciaria de FAE, diferenciando os resíduos perigosos dos restantes ao justapor um asterisco àqueles.

## **2.1.3 - Enquadramento específico**

### **2.1.3.1 - Aplicação aos RCD**

#### **2.1.3.1.1 - A nível nacional**

O sector da construção civil é responsável por uma produção significativa de resíduos sólidos, panorama que tem como agravante o facto do fluxo de tais resíduos ser composto por materiais de constituição heterogénea, com frações de dimensões variadas que apresentam diferentes níveis de perigosidade (Fortunato *et al.*, 2009; Simão e Borges, 2009). Ao referido, acresce-se ainda algumas particularidades ao nível do sector da construção civil, nomeadamente a dispersão geográfica das obras das quais resultam os resíduos e o carácter temporário destas, e alguns constrangimentos à correta gestão de resíduos sólidos, como sejam a difícil quantificação dos resíduos produzidos, a deposição não controlada de resíduos e o recurso a sistemas de processamento de fim de linha (Simão e Borges, *op. cit.*).

Perante os condicionalismos expostos no parágrafo anterior, conducentes “(...) a situações ambientalmente indesejáveis e incompatíveis com os propósitos nacionais e comunitários em matéria de desempenho ambiental (...)” (*ibid.*), urgia a definição de uma política pública específica para a gestão do fluxo de RCD que permitisse “(...) criar instrumentos de acompanhamento dos volumes gerados desde a sua origem até ao destino final (...)”, que incentivasse a “(...) sua triagem e valorização, em detrimento do seu abandono ilegal ou da deposição em aterro, e que clarificasse a atividade de transporte (...)” mediante a definição de regras para as empresas responsáveis por esta atividade e a distinção entre a sua missão e a de um operador de gestão de resíduos (Mimoso, 2007 *in* Lourenço, 2007). Aliás, antes da publicação do DL nº 46/2008, que passou a regulamentar o fluxo de RCD a nível nacional, foram realizados diversos estudos de investigação, e/ou estudos de mestrado e de doutoramento em universidades portuguesas e em laboratórios do estado, onde ficou patenteada a problemática associada à errática gestão de RCD e, consequentemente, a necessidade de regulamentar todas as operações enquadradas nessa gestão. De Melo *et al.* (2011) apontam alguns exemplos, como: (1) Carvalho (2001); (2) a publicação do “*European Waste Manual for Above Ground Construction*”, de 2002, para a qual contribuíram pequenas e médias empresas de cinco países europeus (Alemanha, Dinamarca, Espanha, França e Portugal); (3) Salinas (2002); (4); Ruivo e Veiga (2004); e (5) o “Projeto REAGIR - Reciclagem de Entulho no Âmbito da Gestão Integrada de Resíduos”, desenvolvido pela câmara municipal de Montemor-o-Novo, entre 2003 e 2007, em parceria com o Instituto dos Resíduos - INR, atualmente APA, com a comissão de coordenação e desenvolvimento regional do Alentejo, com o Instituto Superior Técnico - IST, e com a RTS - Pré fabricados de betão, Lda..

Com a publicação do DL nº 46/2008, diploma que estabelece o “(...) regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras, de demolições de edifícios ou de derrocadas (...) compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte,

armazenamento, triagem, tratamento, valorização e eliminação” (Freire, 2011), procurou-se adotar uma abordagem que garantisse “(...) a sustentabilidade ambiental da atividade da construção numa lógica de ciclo de vida”, definindo-se “(...) as metodologias e as práticas a adotar nas fases de projeto e execução da obra (...)” segundo princípios subjacentes à hierarquia da gestão de resíduos (Fortunato *et al.*, 2009). Com efeito, as empresas responsáveis pela produção de RCD passaram a ser obrigadas a colocar em prática, durante a sua atividade, medidas que privilegiassem a prevenção da produção e da perigosidade dos RCD, e o recurso à sua triagem na origem, à sua reciclagem e a outras formas de os valorizar, diminuindo, deste modo, a utilização de recursos naturais e o recurso à deposição em aterro (Simão e Borges, 2009).

Por via da publicação do DL n.º 46/2008 foram instituídas algumas alterações na gestão de RCD em relação ao previsto no RGGR, entre as quais se destacam as seguintes (APA, 2009; Barandas, 2009; Fortunato *et al.*, *op. cit.*; Simão e Borges, *op. cit.*; Riscado, 2011):

- i. a gestão de RCD passou a ser da responsabilidade dos vários intervenientes no seu ciclo de vida, desde o produto original até aos resíduos produzidos;
- ii. definiram-se “metodologias e práticas a serem adotadas nas fases de projeto e respetiva execução da obra (...)”, privilegiando-se desta modo “(...) a aplicação do princípio da hierarquia da gestão de resíduos”;
- iii. no caso dos solos e das rochas não conterem substâncias perigosas, possibilitou-se a aplicação de ambos na obra de que eram provenientes, ou, caso tal não fosse possível, em outras obras, como sejam a recuperação ambiental e paisagística de pedreiras e a cobertura de aterros de resíduos. Os projetistas e os donos de obra são as entidades que mais poderão fomentar a incorporação deste tipo de medida;
- iv. a reutilização de RCD em obra, que deverá ser definida em fase de projeto pelos intervenientes que dispõem dessa capacidade decisória, passou a ser possível se cumpridas as respetivas normas técnicas nacionais ou comunitárias ou, na ausência destas, as especificações técnicas LNEC, designadamente a E 471 (2009) - guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes, a E 472 (2009) - guia para a reciclagem de mistura betuminosas a quente em central, a E 473 (2009) - guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimento, e a E 474 (2009) - guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte;
- v. definiram-se os “requisitos técnicos mínimos para as instalações de triagem e fragmentação”;
- vi. passou a ser obrigatório proceder-se à triagem em obra dos constituintes dos RCD cuja reutilização não fosse uma opção viável ou, quando tal não fosse possível, ao encaminhamento para operadores de gestão licenciados para realizar tal operação;
- vii. definiu-se uma hierarquia de gestão de RCD que privilegiasse a reutilização dos mesmos em obra, precedida da triagem daqueles cuja produção não fosse possível evitar (figura 2.2): caso se verificasse a impossibilidade de se proceder à triagem no local de produção

destes resíduos, tal procedimento poderia ser realizado num local afeto à obra sendo que o encaminhamento dos RCD para operadores licenciados para o efeito se encontra na base desta hierarquia de gestão;

- viii. definiu-se uma guia de transportes dos RCD de modo a simplificar “(...) os problemas relativos à utilização de guias de acompanhamento de resíduos (...)”;
- ix. determinadas operações de gestão passaram a estar dispensadas de licenciamento, nomeadamente nos casos em que não só o procedimento de licenciamento não se traduzisse em uma mais valia ambiental como tais operações constituíssem “(...) um forte obstáculo a uma gestão de RCD consentânea com os princípios da hierarquia de gestão de resíduos”;
- x. passou a ser obrigatória a emissão de “(...) um certificado de receção por parte do operador de gestão de RCD”;
- xi. introduziu-se “(...) uma taxa de gestão de resíduos específica para a deposição de inertes de RCD (...)” de valor inferior ao disposto no DL nº 178/2006, que visa ajustar o referido instrumento tributário às especificações do mercado e combater a concorrência dos agregados resultantes da atividade extrativa; e
- xii. criaram-se mecanismos inovadores ao nível do planeamento e do registo de dados de RCD, em obras particulares, que, em conjugação com o disposto no Código dos Contratos Públicos - CCP, e no Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação - RJUE, permitissem condicionar os atos administrativos associados ao início e à conclusão das obras à prova de uma adequada gestão deste tipo de resíduos.



**Figura 2.2** Hierarquia de gestão de RCD em obra (Carrola, 2008 *in* Barandas, 2009)

Complementarmente às expectativas inerentes à publicação do DL nº 46/2008, Fortunato *et al.* (2009) alerta para a dubiedade do referido diploma quanto ao seu objetivo, com as entidades intervenientes no processo de construção a poderem deter interpretações distintas quanto ao tipo de resíduo abordado. A dificuldade na definição dos RCD por parte do DL nº 46/2008 resulta da coexistência na produção de dois tipos de resíduo: os que resultam diretamente do ato de construir; e os que resultam de atividades acessórias e de apoio, como p. ex., os excedentes, e os resultantes da exploração de cantinas, de Estações de Tratamento de Águas Residuais - ETAR, de separadores de hidrocarbonetos e de exploração de equipamentos (*ibid.*).



A par do exposto, outros constrangimentos mantiveram-se por solucionar após a publicação do DL nº 46/2008, nomeadamente como os que respeitam ao escoamento dos inertes dos RCD perante os preços concorrenciais praticados pelos agregados naturais provenientes da atividade extrativa (Simão e Borges, 2009). Esta problemática, solucionável mediante a concretização de medidas legais e/ou normativas que estabeleçam a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados como materiais de construção, numa percentagem mínima, nas obras de engenharia civil em substituição dos agregados naturais, foi contudo, visada com a publicação da DQR.

Em termos de articulação com outros documentos legislativos, refira-se que o DL nº 46/2008, por um lado, assenta nos princípios preconizados pelo RGGR, agora RGPPGR, mas concretiza-os para a realidade dos RCD, o que, desta forma, simplifica algumas práticas, que pelo RGGR, eram demasiado burocráticas e onerosas, e, por outro lado, no CCP e no RJUE passou a constar a obrigatoriedade do cumprimento do regime da gestão de RCD definido no DL nº 46/2008 (*ibid.*; Sousa e Monteiro, 2009).

#### **2.1.3.1.2 - A nível internacional**

Os PCE não procederam até à presente data à publicação de uma legislação comunitária a cumprir pelos 27 estados-membros da UE com vista à regulamentação do fluxo de RCD por estes produzidos. Contudo, importa referir que na DQR, ainda que esta se trate de um documento genérico em matéria da gestão de resíduos, são estabelecidas algumas medidas que visam diretamente a gestão de RCD produzidos em espaço europeu, pelo que a sua abordagem na presente secção justifica-se.

Com efeito, do exposto na DQR refere-se a alínea c) do art.º 2, na qual se exclui da aplicação da referida Diretiva “(...) o solo não contaminado e outros materiais naturais resultantes de escavações no âmbito de atividades de construção, sempre que se tenha a certeza de que os materiais em causa serão utilizados para efeito de construção no seu estado natural e no local em que foram escavados (...)”, e a alínea b) do nº 2 do art.º 11, onde se refere que até o ano de 2020, “(...) a preparação para a reutilização, reciclagem e valorização de (...) RCD não perigosos (...) sofre um aumento mínimo de 70% em peso”. Em termos práticos, com o descrito na alínea c) do art.º 2 procura-se uma solução para os solos de escavação, que, em certos casos, não devem ser enquadrados na categoria dos RCD, ao passo que de acordo com a informação constante na alínea b) do nº 2 do art.º 11, são definidas metas para a reciclagem dos RCD produzidos (Mália, 2010). Contudo, contrariamente ao desejável, as medidas definidas nos artigos abordadas não foram ainda integradas no quadro legal de grande parte dos estados-membros da UE, afigurando-se a sua implementação e o seu cumprimento, uma tarefa complexa, sobretudo para aqueles estados que apresentem reduzidas taxas de reciclagem de RCD (BIO *Intelligence Service*, 2011).

A inexistência de uma legislação comunitária no âmbito da gestão do fluxo de RCD é colmatada em alguns estados-membros, como a Alemanha, a Bélgica, a Dinamarca, a Espanha, a Finlândia, os Países Baixos e o Reino Unido, entre outros, pela implementação de medidas e de

instrumentos legais com o propósito de promover a prevenção e o reaproveitamento de resíduos e, em particular dos RCD (*UmweltBundesAmt* - UBA, 2008; Mália, 2010; *BIO Intelligence Service*, 2011). Ainda que estas medidas comprovem a importância que uma correta gestão dos RCD tem no panorama da sociedade atual e representem um conjunto de informação relevante no âmbito da temática abordada nesta dissertação e, em particular na presente secção, optou-se, face ao volume de informação que representam, pela sua apresentação, resumida, no Anexo VIII.

### **2.1.3.2 - Aplicação às escórias de aciaria de FAE**

#### **2.1.3.2.1 - A nível nacional**

De acordo com o atual quadro legislativo em vigor em Portugal, não foi publicado até à presente data nenhum documento legislativo que enquadre as operações de gestão das escórias de aciaria de FAE, contrariamente ao que se verifica em relação aos RCD. Deste modo, a gestão do fluxo das referidas escórias produzidas em Portugal é regulada pelo DL n.º 73/2011, diploma já abordado na secção 2.1.2.

#### **2.1.3.2.2 - A nível internacional**

Em conformidade com o descrito na secção 2.1.3.1.2, mantém-se por definir uma lei comunitária que regule a gestão do fluxo das escórias de aciaria de FAE produzidas em espaço europeu. No que respeita à DQR, contrariamente ao exposto para os RCD, nesta não é feita referência a quaisquer medidas que visem diretamente a gestão das escórias.

Em contraposto, alguns estados-membros da UE, como é o caso da Alemanha, da Bélgica, da Espanha e da Itália, já implementaram algumas medidas, resumidas no Anexo IX, com o propósito de prevenir a produção e promover o reaproveitamento daquelas escórias. Destas medidas, importa destacar, dada a sua convergência, os diplomas espanhóis, *Decreto* 34/2003, *Decreto* 104/2006 e *Decreto* 32/2009, que, apesar de publicados por diferentes comunidades autónomas, respetivamente, do País Basco, da Cantábria e da Catalunha, estabelecem o regime jurídico aplicável à gestão das escórias ferrosas produzidas nas respetivas comunidades, e têm como propósito promover a valorização daquelas escórias em detrimento do seu envio para aterro e garantir uma adequada proteção ao meio ambiente e da saúde pública.

Em termos de conteúdo, de referir, por um lado, que os três diplomas diferem nos termos que apresentam no âmbito da temática que regulam, enquanto que outras temáticas são abordadas apenas em alguns diplomas. A classificação e a caracterização das escórias ferrosas são tratadas somente no art.º 3 do *Decreto* 104/2006, ao passo que as condições técnicas para a instalação de centrais de processamento das escórias ferrosas e as obrigações a cumprir por parte do seu produtor, do responsável pelo seu processamento e do seu utilizador, encontram-se regulamentadas, respetivamente, no art.º 4, art.º 9, art.º 10 e art.º 11 do *Decreto* 32/2009.

Por outro lado, são consensuais em alguns aspetos, dado que:

- i. decretam que a opção pela valorização das escórias ferrosas em obras de engenharia civil só poderá ser autorizada por parte da Direção Geral do Meio Ambiente - DGMA, da respetiva comunidade autónoma, e após prévia verificação das condições das centrais onde se procedeu ao seu processamento - a solicitação de tal autorização deverá ser acompanhada por documentação técnica especificada nos respetivos diplomas, devendo o resultado da solicitação ser conhecido no prazo máximo de três a seis meses, dependendo do estipulado na legislação;
- ii. definem os parâmetros químicos e os respetivos valores-limite para a admissibilidade das escórias ferrosas como agregados reciclados a valorizar - os ensaios de lixiviação são realizados mediante a norma *European Normalisation* - EN 12457-4 (2002); e
- iii. definem as aplicações e as condições para que se proceda à valorização das escórias ferrosas. De acordo com o *Decreto* 34/2003 e o *Decreto* 104/2006, as escórias negras podem ser utilizadas em infraestruturas de transporte e vias públicas ou privadas, mais concretamente nas camadas de desgaste e da base e sub-base; em projetos de urbanização de áreas industriais; nas camadas dos sistemas de selagem de aterros de resíduos; na produção de cimento; e como agregado reciclado para a produção de betão. As escórias brancas podem ser utilizadas apenas como matéria-prima para a produção de cimento. A valorização das escórias em aplicações não previstas pelos respetivos diplomas encontra-se sujeita a uma prévia autorização por parte da DGMA da respetiva comunidade autónoma, à apresentação da justificação da idoneidade da aplicação proposta e, ainda, de documentação técnica especificada nos respetivos diplomas.

A eficiência dos três diplomas tratados nesta secção, materializada pela correta gestão e consequente taxa elevada de reciclagem das escórias ferrosas produzidas nas respetivas comunidades autónomas espanholas, poderá funcionar como incentivo para que outros estados-membros da UE, sobretudo os que apresentem valores elevados de produção das escórias ferrosas, estabeleçam medidas ou definam instrumentos legislativos, visando a correta gestão do fluxo dos referidos resíduos por parte dos respetivos países.

## **2.2 - Regulamentação técnica para os RCD e para as escórias de aciaria de FAE**

A crescente preocupação com os problemas ambientais aliada à evolução técnico-científica e à definição de um quadro jurídico cada vez mais restrito no âmbito da gestão do fluxo de resíduos culminou na procura de soluções de valorização para os agregados reciclados, passando esta atividade a ser encarada como uma alternativa técnica, económica e ambientalmente atrativa à utilização dos agregados naturais (Batista *et al.*, 2009). Se bem que, numa fase preliminar, a valorização dos agregados reciclados em obras de engenharia civil fosse avaliada com base em

normalizações e regulamentações desenvolvidas para serem aplicadas aos agregados naturais (Ferreira, 2010), o facto destes dois tipos de agregados apresentarem diferentes propriedades ambientais, químicas, mineralógicas, físicas e mecânicas, levou à necessidade de se desenvolverem metodologias de estudo e regulamentos direccionados para a caracterização dos agregados reciclados. Ao exposto, acresce a necessidade de se proceder ao controle de qualidade de execução da obra em que forem aplicados e à avaliação do seu desempenho na fase de serviço (Batista *et al.*, 2009). É neste contexto que a nível nacional e internacional, diversas entidades competentes para o efeito têm vindo a desenvolver novas especificações e/ou a proceder a alterações em especificações desenvolvidas na ótica da utilização dos agregados naturais, com vista a contemplar valores-limite para os agregados reciclados, tornando assim a legislação mais adequada à incorporação destes últimos na construção de infraestruturas viárias e em obras geotécnicas (Ferreira, *op. cit.*).

A 21 de dezembro de 1998, a CEE procedeu à publicação da Diretiva 89/106/CEE, igualmente designada Diretiva dos Produtos de Construção - DPC, tendo, posteriormente, sido alterada pela Diretiva 93/68/CEE, de 22 de julho, transposta para a ordem jurídica interna através do DL nº 113/93, de 10 de abril, e revogada pelo regulamento (UE) nº 305/2011 (Batista *et al.*, *op. cit.*). A DPC visa diretamente os produtos de construção, nos quais se incluem os agregados reciclados resultantes do processamento dos RCD e das escórias de aciaria de FAE, "(...) destinados a serem incorporados de modo permanente em obras de engenharia civil e aos quais diz respeito uma ou mais exigências essenciais" (*ibid.*), e teve como propósito concretizar condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção, eliminando, deste modo, os condicionalismos técnicos que restringem as suas trocas comerciais, e fomentando a sua livre circulação no Espaço Económico Europeu - EEE. A incorporação permanente dos materiais abrangidos pela DPC em obras de engenharia civil só é possível mediante o cumprimento de determinados parâmetros, como p. ex.: a resistência mecânica; a segurança contra incêndios; a higiene, a saúde e o ambiente; a segurança na utilização; o conforto acústico; a economia de energia; e o isolamento térmico, sendo esse cumprimento assinalado pela marcação CE. A aposição desta marcação nos produtos de construção constitui assim uma garantia, evidenciada por parte do produtor, de que o produto comercializado encontra-se em concordância com as diretivas comunitárias que lhes são aplicáveis, podendo deste modo circular livremente dentro do EEE (LNEC, 2012).

Na sequência da DPC foi emitido o mandato M/125 pela CEE, para que fossem elaboradas pelo *Comité Européen de Normalisation* - CEN, normas de produtos e de ensaios (Batista *et al.*, *op. cit.*). Desta forma, pretendia-se, por um lado, assegurar que materiais naturais, artificiais, reciclados ou certos materiais de nova origem ou menos correntes, a utilizar em diversos tipos de aplicações (tabela 2.1), cumprissem com os requisitos estabelecidos na DPC e, por outro lado, definir um conjunto de normas, a serem utilizadas por todos os estados-membros da UE, tendo em vista as aplicações destinadas aos agregados (*ibid.*).

**Tabela 2.1** Tipo de aplicações definidas em M/125 para os diversos tipos de materiais (adaptado de UBA, 2008)

Tipo de aplicações para os agregados	Pavimentos, estradas e outras estruturas de circulação
	Fundações e muros de contenção
	Pilares de Fundação
	Paredes externas, internas e divisórias
	Telhados
	Pisos, galerias, e tetos
	Chaminés e poços
	Deposição em aterro de resíduos
	Sistema de drenagem e de recolha de líquidos ou de gases
	Sistema de vácuo e para o fornecimento de gases
	Fornecimento de eletricidade
	Comunicação
	Dispositivos de circulação
	Equipamentos de armazenamento

Atualmente, os agregados reciclados, em geral, já se encontram abrangidos por normas de produto, normas de ensaio, especificações e guias de aplicação, conforme referem e especificam Batista *et al.* (2009). No que respeita aos agregados reciclados resultantes do processamento dos RCD e das escórias de aciaria de FAE e considerando o tipo de aplicação objeto da presente dissertação para a sua valorização, não se conhece a publicação de qualquer tipo de norma, especificação ou guia de aplicação que regule a utilização daqueles resíduos na construção de estruturas de drenagem, em geral, e da camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de proteção basal dos aterros de resíduos, em particular. A documentação técnica publicada no âmbito dos RCD visa, na sua generalidade, a utilização destes na produção de betão e em pavimentos rodoviários como referem Dos Santos (2007), Gonçalves (2007), Leite (2007), LNEC E 471:2009 a LNEC E 474:2009, LNEC (2010), Mália, (2010) e BIO *Intelligence Service* (2011). Já a destinada às escórias de aciaria de FAE, está principalmente relacionada com a sua valorização em pavimentos rodoviários, como menciona Ferreira (2010).

## 2.3 - Aterro de resíduos e camada de drenagem e recolha dos lixiviados

### 2.3.1 - Considerações gerais

Durante séculos as sociedades criaram, a partir de matérias-primas naturais, reduzidas quantidades de resíduos, quase sempre inertes ou de fácil degradação. Com a crescente evolução das atividades industriais e a geração de novos produtos, associada ao aumento da população mundial e do consumo, o homem passou a produzir mais quantidades de resíduos, alguns dos quais prejudiciais para o meio ambiente e para a saúde pública, principalmente quando vazados no meio ambiente sem qualquer tipo de tratamento e de confinamento. Um relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico - OCDE, de 1993, referia que em Portugal, no ano de 1988, "(...) os resíduos eram depositados em 400 vazadouros não controlados e em 27 vazadouros

controlados, para onde eram encaminhados apenas cerca de 28% dos resíduos produzidos” (OCDE, 2000 *in* Martinho *et al.*, 2008a). Com a aprovação do Plano Estratégico sectorial de gestão de Resíduos Sólidos Urbanos - PERSU, em novembro de 1997, deram-se os primeiros passos em matéria de gestão de resíduos em Portugal, com uma das principais medidas a passar pelo encerramento de todos os locais de deposição ilegal. Alguns dos resíduos depositados nesses locais foram então transferidos para aterros de resíduos, permanecendo a maior parte no mesmo local, mas isolados do meio envolvente através da construção de uma cobertura final (Martinho *et al.*, *op. cit.*a).

Os aterros de resíduos começaram por ser uma infraestrutura para a deposição de resíduos na maioria dos países a nível mundial (Arigala *et al.*, 1995 *in* Gourc e Staub, 2010) há mais de 100 anos. Atualmente são concebidos para integrarem sistemas de gestão de resíduos, onde deve prevalecer a hierarquia de apenas eliminar os resíduos para os quais é impossível a sua reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização.

O aterro de resíduos é definido pela *American Society of Civil Engineers - ASCE* (*in* Ministerio de medio ambiente y agua, 2010) como uma técnica de eliminação de resíduos sólidos no solo que implica risco mínimo para a segurança e para a saúde pública, assim como para o meio ambiente, quer durante a sua fase de exploração, quer após o seu encerramento. Ainda segundo a mesma fonte é possível, com a referida técnica, o confinamento de grandes quantidades de resíduos em pequenas áreas de terreno, sobrepondo-os em diferentes camadas, compactando-os e cobrindo-os com material inerte.

Do ponto vista funcional, Levy e Cabeças (2006) referem-se ao aterro de RSU como "(...) um reator bioquímico em que os resíduos e águas pluviais são as principais entradas, e os lixiviados e o biogás, os principais efluentes produzidos em resultado da decomposição dos componentes biodegradáveis dos RSU ou equiparados". Neste sentido, os elementos constituintes do corpo do aterro de resíduos, nomeadamente os sistemas de proteção basal passivo e ativo, e o sistema de selagem final, devem ser projetados, estruturados e construídos com o propósito de criar uma barreira entre os resíduos depositados e o meio ambiente envolvente, e maximizar a quantidade de resíduos armazenados por unidade de área, a fim de minimizar a contaminação das águas superficiais e subterrâneas e do subsolo e, conseqüentemente, o impacto ambiental e social resultante da produção dos efluentes gerados.

Um dos elementos constituintes do sistema de proteção basal ativo é a camada de drenagem e recolha dos lixiviados. Sabendo-se da sua importância no adequado funcionamento dos aterros de resíduos, do volume elevado de material que pode ser reciclado na sua construção e, ainda, do número de aterros de resíduos que vão continuar a ser construídos ou ampliados em Portugal, considerou-se relevante proceder à avaliação da viabilidade técnica de utilizar dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, na sua construção. Este objetivo justifica assim uma abordagem geral sobre as principais características de um aterro de resíduos e uma descrição mais detalhada dos aspetos referentes à camada de drenagem e recolha dos lixiviados.

Para o efeito, na secção 2.3.2, começa-se por abordar a legislação, o DL nº 183/2009, que estabelece em Portugal o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro, referindo em particular os aspetos técnicos e, destes, apenas os mais importantes ao seu enquadramento na temática

- 22 -

abordada na presente dissertação. De seguida, na secção 2.3.3 apresentam-se algumas considerações sobre as principais componentes estruturais de um aterro de resíduos. De entre estas, e pelas razões já mencionadas, na secção 2.3.4 detalha-se a camada de drenagem e recolha de lixiviados.

Na última secção, 2.3.5, são tratadas a produção dos lixiviados, os fatores intervenientes na mesma e a composição química tipo dos lixiviados dos aterros de RSU.

### **2.3.2 - Legislação**

No sentido de dar continuidade a uma política de promoção de reciclagem e de valorização de resíduos que vinha a ser desenvolvida e materializada com a publicação da DQR, e de garantir a total conformidade da legislação portuguesa com a Diretiva 99/31/CE, de 26 de abril, em matéria de conceitos, conteúdo de licenças, obrigações de reporte e registo, prazo de adaptação aos requisitos da diretiva e medidas de redução dos riscos para o ambiente, procedeu-se à publicação do DL nº 183/2009, de 9 de agosto. Este diploma, que revoga o DL nº 152/2002, de 23 de maio e transpõe para a ordem jurídica interna a referida Diretiva da CE relativa à deposição de resíduos em aterros, estabelece “o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro” e “os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros”. A relevância da referência ao DL nº 183/2009 para a presente dissertação resulta de, no documento, constarem a definição de alguns termos técnicos importantes, como é o caso de “aterro” e de “lixiviado”, a classificação dos diferentes tipos de aterros de resíduos, os requisitos mínimos a que estas infraestruturas devem obedecer em termos de composição estrutural e os respetivos critérios de admissão de resíduos.

Com efeito, refira-se que, de acordo com o descrito no art.º 4 do DL nº 183/2009, o aterro trata-se de uma “(...) instalação de eliminação de resíduos através da sua deposição acima ou abaixo da superfície natural, incluindo: (1) as instalações de eliminação internas, considerando-se como tal os aterros onde o produtor de resíduos efetua a sua própria eliminação de resíduos no local de produção; e (2) uma instalação permanente, considerando-se como tal a que tiver uma vida útil superior a um ano, usada para armazenagem temporária”. Esta instalação é classificada em três classes em função dos resíduos admitidos (art.º 10): (1) aterros para resíduos inertes; (2) aterros para resíduos não perigosos; e (3) aterros para resíduos perigosos, e, de acordo com o disposto no art.º 11, encontra-se sujeita ao “(...) cumprimento de requisitos técnicos (...) referentes à localização, à estabilidade, ao controlo de emissões e proteção do solo e das águas, aos equipamentos, às instalações e infraestruturas de apoio e ao encerramento e integração paisagística”.

Na tabela 2.2 apresentam-se apenas os requisitos estruturais a cumprir por parte das três classes de aterros anteriormente enumeradas no que respeita ao controlo de emissões e proteção do solo e das águas. A definição destes requisitos visa garantir que, aquando da conceção de um aterro

de resíduos, são criadas condições para evitar a poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas.

Nas secções seguintes são detalhados cada um dos sistemas considerados na tabela 2.2, dando particular ênfase ao sistema de drenagem e recolha dos lixiviados presente no sistema de proteção basal ativo por se tratar da aplicação onde se pretende valorizar os dois agregados reciclados selecionados para este estudo.

**Tabela 2.2** Requisitos mínimos a que o aterro de resíduos deve obedecer (adaptado de DL nº 183/2009)

Sistema	Elemento estrutural	Classe do aterro		
		Aterro para resíduos inertes	Aterro para resíduos não perigosos	Aterro para resíduos perigosos
<b>Sistema de proteção basal passivo</b>	Barreira de segurança passiva	Sim	Sim	Sim
<b>Sistema de proteção basal ativo</b>	Barreira de impermeabilização artificial	-	Sim	Sim
	Sistema de drenagem de águas pluviais	-	Sim	Sim
	Sistema de drenagem e recolha dos lixiviados	-	Sim	Sim
	Sistema de drenagem e tratamentos de biogás	-	(*)	(*)
<b>Sistema de selagem final</b>	Camada de drenagem de biogás	-	(*)	(*)
	Barreira de impermeabilização artificial	-	-	Sim
	Camada mineral impermeável	-	Sim	Sim
	Camada de drenagem >0,5 m	-	Sim	Sim
	Cobertura final com material terroso >1 m	Sim	Sim	Sim

Legenda: (\*) a definir em função do tipo de resíduos admitidos no aterro

No que diz respeito aos resíduos a enviar para aterro, os critérios para a sua admissão envolvem, na sua generalidade, a realização de ensaios de lixiviação segundo as normas EN 12457-2 (2002) ou EN 12457-4 (2002). Mediante a comparação dos resultados obtidos nestes ensaios com os valores-limite de lixiviação estabelecidos no DL nº 183/2009, os resíduos serão depositados em aterros para resíduos inertes, para resíduos não perigosos, ou para resíduos perigosos. Neste conjunto de resíduos excluem-se os resíduos líquidos, os resíduos que são explosivos, corrosivos, oxidantes e muito inflamáveis, os resíduos hospitalares e os pneus usados com exceção dos utilizados como elementos de proteção em aterros e aqueles que tenham um diâmetro exterior superior a 1,4 m (art.º 6).

Na tabela 2.3 apresentam os valores-limite de lixiviação e na tabela 2.4 os valores-limite para o teor total de parâmetros orgânicos, ambos referentes aos resíduos que são admissíveis em aterros para resíduos inertes. Apenas se apresentam os valores para este tipo de resíduos por serem os considerados por parte da entidade reguladora nacional do setor, a APA, para permitir a reciclagem de resíduos em obras de engenharia civil.

Importa salientar que os resíduos considerados previamente pelo DL nº 183/2009 como resíduos inertes, nos quais se incluiu o  $AB_{RCD}$  que resulta do processamento de RCD de betão, não necessitam de ser submetidos a ensaios para avaliar o seu comportamento ambiental desde que cumpram as condições especificadas no referido diploma.



**Tabela 2.3** Valores-limite de lixiviação para os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes (adaptado de DL nº 183/2009)

Parâmetro	Valor-limite (a)
<i>Arsénio, As</i>	0,5
<i>Bário, Ba</i>	20
<i>Cádmio, Cd</i>	0,04
<i>Crómio total</i>	0,5
<i>Cobre, Cu</i>	2
<i>Mercurio, Hg</i>	0,01
<i>Molibdénio, Mo</i>	0,5
<i>Níquel, Ni</i>	0,4
<i>Chumbo, Pb</i>	0,5
<i>Antimónio, Sb</i>	0,06
<i>Selénio, Se</i>	0,1
<i>Zinco, Zn</i>	4
<i>Cloreto, Cl (d)</i>	800
<i>Fluoreto, F</i>	10
<i>Sulfato, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (d)</i>	1000 (b)
<i>Índice de fenol</i>	1
<i>COD</i>	500 (c)
<i>SDT (d)</i>	4000

Legenda: Carbono Orgânico Dissolvido - COD; Sólidos Dissolvidos Totais - SDT; (a) ensaio de lixiviação realizado pela EN 12457-1 (2002) ou EN 12457-4 (2002), com relação líquido - L, para sólido - S, para libertação total L/S = 10 l/kg; (b) se o resíduo não satisfizer este valor, poderá continuar a ser considerado conforme aos critérios de admissão, desde que a lixiviação não exceda o valor de 6000 mg/kg a L/S = 10 l/kg; (c) se o resíduo não satisfizer este valor relativamente ao COD ao seu próprio valor de pH, este poderá ser alternativamente verificado com L/S = 10 l/kg e a um pH entre 7,5 e 8,0. O resíduo pode ser considerado conforme aos critérios de admissão para COD se o resultado dessa determinação não exceder 500 mg/kg; (d) Os valores para SDT podem ser utilizados em alternativa aos valores para o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e o Cl

**Tabela 2.4** Valores-limite para o teor total de parâmetros orgânicos para os resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes (adaptado de DL nº 183/2009)

Parâmetro	Valor-limite
<i>COT</i>	30000 (a)
<i>BTEX</i>	6
<i>PCB (b)</i>	1
<i>Óleo mineral</i>	500
<i>HAP (c)</i>	100

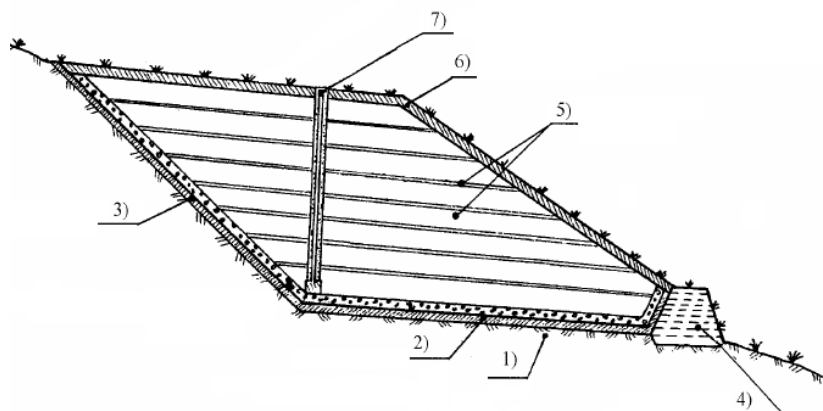
Legenda: Carbono Orgânico Total - COT; Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno - BTEX; Policlorobifenilos 7 Congéneres - PCB; Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos - HAP; (a) no caso de solos, a entidade licenciadora pode aceitar um valor-limite superior, desde que seja respeitado o valor-limite do COD (tabela 2.3); (b) PCB 28 - (2,4,4' - triclorobifenilo), PCB 52 - (2,2',5,5' - tetraclorobifenilo), PCB 101 - (2,2',4,5,5' - pentaclorobifenilo), PCB 118 - (2,3',4,4',5' - pentaclorobifenilo), PCB 138 - (2,2',3,4,4',5' - hexaclorobifenilo), PCB 153 - (2,2',4,4',5,5' - hexaclorobifenilo), PCB 180 - (2,2',3,4,4',5,5' - heptaclorobifenilo); (c) acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzoantraceno, benzopireno, benzo(a)fluoranteno, benzo(a)perileno, benzo(a)fluoranteno, criseno, dibenzoantraceno, fluoranteno, fluoreno, indeno (1,2,3) pireno, naftaleno, fenantreno, pireno

Com a publicação do DL nº 183/2009 foram revistos alguns aspetos inerentes ao quadro legal aplicável à deposição de resíduos em aterro, numa lógica de reforço das medidas de promoção "(...)" da valorização e da adaptação da operação de deposição de resíduos em aterro "(...)", bem como, "(...)" de harmonização legislativa e de simplificação processual.

### 2.3.3 - Principais componentes estruturais

A configuração comum de um aterro de resíduos compreende, segundo Brandl (1998) e Heerten (2010), a conjugação das seguintes "barreiras" estruturadas da base para o topo: (1) barreira de segurança passiva - barreira geológica natural ou artificialmente criada; (2) barreira de segurança ativa; e (3) sistema de selagem, ou cobertura, final (figura 2.3). As duas primeiras barreiras, pertencentes ao sistema de proteção basal, revestem o fundo e os taludes laterais interiores do aterro

e a sua utilização justifica-se pela sua complementaridade, conferindo ao sistema que compõem maior durabilidade e maior eficiência nas funções a desempenhar (Brandl, 1998). Apesar das três barreiras funcionarem de modo independente, permitem, em conjunto, o confinamento dos resíduos depositados, promovendo, dessa forma, uma proteção eficaz contra a infiltração e a percolação de águas pluviais na massa de resíduos depositados, e a migração dos lixiviados para o seu exterior, minimizando a contaminação do subsolo e das águas superficiais e subterrâneas.



Legenda: (1) barreira de segurança passiva; (2) barreira de segurança ativa; (3) barreiras de segurança, passiva e ativa, em talude; (4) dique; (5) resíduos; (6) sistema de selagem, ou cobertura, final; (7) poço de extração do biogás

**Figura 2.3** Representação esquemática de um aterro de resíduos (adaptado de Russo, 2003)

Os sistemas de proteção basal e de selagem final podem, por sua vez, serem compostos por distintos elementos estruturais e estes apresentarem distintas configurações entre aterros de resíduos construídos em diferentes regiões e países (Daniel, 1998; Regueiro, 2006), em particular naqueles em que o dimensionamento é efetuado com base em critérios de desempenho e não em critérios prescritivos.

Os Estados Unidos da América - EUA, e o Canadá foram dos primeiros países a adotar os critérios de desempenho para a conceção e o dimensionamento de um aterro de resíduos. Estes critérios têm em conta, as condições geológico-geotécnicas do local, o tempo de transporte dos contaminantes e as respetivas concentrações químicas admissíveis nos solos e nas águas superficiais e subterrâneas, entre outros (Lopes e Barroso, 2011a).

A maior parte dos países, designadamente os estados-membros da UE, continuam contudo a seguir critérios prescritivos para o dimensionamento dos aterros de resíduos. Estes critérios são entendidos como os requisitos mínimos previstos em regulamentos sobre a conceção, a composição e o funcionamento da obra (*ibid.*).

Nas secções seguintes detalham-se as duas barreiras de segurança, a passiva e a ativa, que integram o aterro de resíduos, assim como o sistema de selagem final.

### **2.3.3.1 - Sistema de proteção basal passivo**

De acordo com o DL nº 183/2009, a barreira de segurança passiva do sistema de proteção basal de um aterro de resíduos deve ser constituída por uma formação geológica de baixa

permeabilidade e espessura adequada na base e nos taludes interiores do aterro, e que assegure, em termos de proteção do solo e das águas superficiais e subterrâneas, pelo menos o equivalente à que resulta das condições expostas na tabela 2.5. O principal objetivo desta barreira passa pela contenção dos lixiviados que provenham de fugas no sistema de proteção basal ativo e evitar a migração daquele efluente para o meio envolvente, protegendo os solos e as águas superficiais e subterrâneas (Roque, 2011a).

**Tabela 2.5** Requisitos mínimos para a permeabilidade e para a espessura da barreira passiva (adaptado de DL nº 183/2009)

Parâmetro	Classe do aterro		
	Aterro para resíduos inertes	Aterro para resíduos não perigosos	Aterro para resíduos perigosos
Condutividade hidráulica (m/s)	$\leq 1 \times 10^{-7}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$
Espessura (m)	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 5$

Legenda: condutividade hidráulica -  $k$

No caso da barreira geológica natural não garantir as condições indicadas na tabela 2.5, de acordo com DL nº 183/2009, a mesma deve ser “(...) complementada e reforçada artificialmente por outros meios ou materiais que assegurem uma proteção equivalente”. Para o efeito, recorre-se à construção de uma barreira geológica artificial, de espessura não inferior a 0,5 m, utilizando-se preferencialmente solos argilosos dada a sua  $k$  baixa e capacidade elevada de adsorver e reter os elementos poluentes transportados pelos lixiviados (Regueiro, 2006). É igualmente frequente a barreira artificial ser composta por uma geomembrana disposta sobre a camada de solos argilosos compactados, estrutura que se designa por sistema geocompósito (Russo, 2005).

Para maximizar o desempenho da barreira de segurança passiva é necessário proceder a um adequado e criterioso controlo da qualidade da sua construção (Roque, *op. cit.*a). Este tem por objetivo garantir: que se utilizam materiais adequados na construção da barreira artificial tendo em conta o seu objetivo; que o método de construção da barreira é o apropriado, com os materiais a serem devidamente colocados e compactados, garantindo, assim, um bom contacto entre camadas sobrepostas e minimizando os fenómenos de dessecação das camadas após sua compactação; que as camadas compactadas que constituem a barreira ficam devidamente protegidas; e que a barreira assegura uma adequada proteção aos terrenos subjacentes durante e após a exploração do aterro de resíduos (*ibid.*).

### **2.3.3.2 - Sistema de proteção basal ativo**

A par do sistema de proteção basal passivo, todos os aterros de resíduos, com exceção dos destinados a resíduos inertes, devem, de acordo com o DL nº 183/2009, estar ainda providos de um sistema de proteção basal ativo sobrejacente ao passivo. Este sistema é composto por uma geomembrana, que assenta diretamente sobre a barreira de segurança passiva, e uma camada de drenagem, habitualmente construída com solos granulares naturais ou com agregados britados no fundo do aterro e com geocompósitos drenantes nos taludes interiores. A construção deste sistema visa minimizar a área de contacto entre os lixiviados produzidos e o sistema de proteção basal

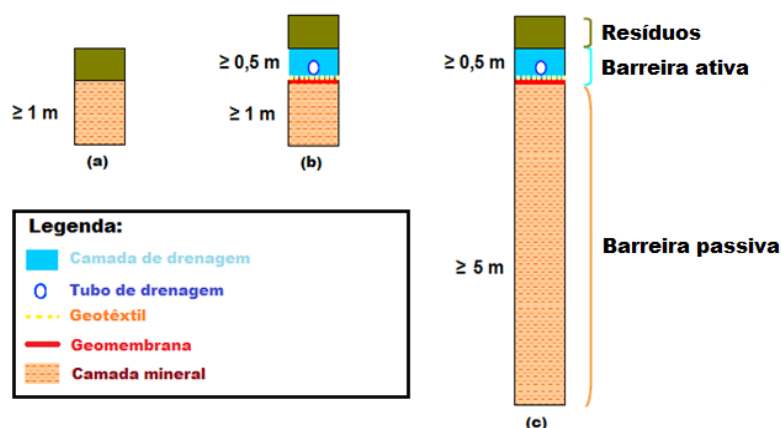
passivo, controlar a carga hidráulica dos lixiviados acima dos sistemas de proteção basal e permitir a remoção dos lixiviados para posterior tratamento e eliminação (Roque, 2011b).

Na tabela 2.6 abordam-se os elementos constituintes do sistema de proteção basal ativo segundo uma sequência estrutural da base para o topo, ilustrando a figura 2.4 uma representação esquemática do mesmo com o sistema de proteção basal passivo para as três classes de aterros de resíduos previstas na legislação portuguesa.

**Tabela 2.6** Elementos constituintes de um sistema de proteção basal ativo e respetivas considerações mais relevantes (adaptado de Regueiro, 2006; Levy e Cabeça, 2006)

Elemento constituinte	Informação relevante
<b>Geomembrana</b>	<b>Considerações gerais:</b> As geomembranas asseguram a continuidade de um material de permeabilidade extremamente baixa. <b>Função:</b> Minimizar a potencial contaminação do meio ambiente.
<b>Geotêxtil não tecido</b>	<b>Considerações gerais:</b> O geotêxtil é colocado sobre a geomembrana e tem de prolongar-se ao longo do talude de forma a assegurar uma sobreposição mínima de 0,5 m. <b>Função:</b> Proteção mecânica da geomembrana ao punçoamento e ao rasgamento. A sua eficácia está diretamente relacionada com a sua massa unitária e a sua espessura, pelo que os geotêxteis mais pesados e mais espessos proporcionam uma maior proteção.
<b>Camada de drenagem</b>	Por se tratar da estrutura onde se prevê a valorização dos agregados reciclados estudados, a camada de drenagem é tratada na secção 2.3.4.
<b>Geotêxtil não tecido</b>	<b>Considerações gerais:</b> Em situações específicas, pode-se optar por colocar um geotêxtil sobre a camada de drenagem, na interface com os resíduos depositados, devendo este possuir uma $k$ superior à dos resíduos depositados e o material que o compõe não migrar para a camada de drenagem. Este geotêxtil poderá ser colocado apenas na fase de exploração e deverá ser estendido ao longo dos taludes até assegurar a sobreposição mínima de 0,5 m. <b>Função:</b> Evitar a passagem de quantidades significativas de material oriundo dos resíduos.

Legenda: PoliEtileno de Alta Densidade - PEAD



Legenda: (a) aterro para resíduos inertes; (b) aterro para RSU e resíduos industriais banais (resíduos não perigosos); (c) aterro para resíduos industriais perigosos

**Figura 2.4** Representação esquemática do sistema de proteção basal, barreira passiva e ativa, dos aterros de resíduos, em acordo com o DL nº 183/2009 (fundo e taludes laterais interiores) (adaptado de Roque, 2011b)

### 2.3.3.3 - Sistema de selagem final

A fase de exploração dos aterros de resíduos termina quando a altura dos resíduos depositados iguala a altura definida no projeto de execução do aterro. Terminada esta fase, procede-se ao seu encerramento mediante a construção do sistema de selagem final, também designado por cobertura final (Levy e Cabeças, 2006).

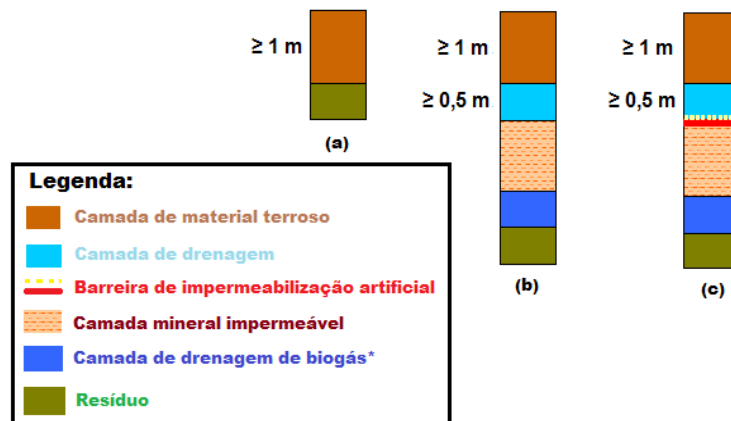
O sistema de selagem final representa a primeira barreira do aterro de resíduos contra a entrada de águas pluviais na massa dos resíduos depositados e a sua construção tem por objetivo minimizar a produção de lixiviados (Melchior *et al.*, 1993 in Russo, 2003; Regueiro, 2006; Roque, 2011b), controlar a emissão dos gases do aterro (Regueiro, *op. cit.*; Roque, *op. cit.*b) para a atmosfera e biosfera (Russo, *op. cit.*), fornecer condições para o crescimento de vegetação superficial (Hoeks e Ryhiner, 1989 in Russo, *op. cit.*), proteger pessoas e animais do contacto direto com os resíduos (Roque, *op. cit.*b), e providenciar uma adequada e duradoura integração paisagística (Lopes e Barroso, 2011b).

Na tabela 2.7 abordam-se os diversos elementos constituintes do sistema de selagem final segundo uma sequência estrutural da base para o topo.

**Tabela 2.7** Elementos constituintes de um sistema de selagem final e respetivas considerações mais relevantes (adaptado de Van Impe, 1998)

Elemento constituinte	Informação relevante
<b>Camada de drenagem de biogás</b>	<b>Considerações gerais:</b> Camada necessária quando os resíduos depositados geram grandes quantidades de gases. <b>Função:</b> Encaminhar os gases gerados para os diversos pontos de recolha. <b>Material utilizado:</b> Areia; geotêxteis.
<b>Camada impermeável</b>	<b>Considerações gerais:</b> Em climas muito secos, a sua construção pode não ser necessária. <b>Função:</b> Minimizar a infiltração das águas pluviais nos resíduos depositados e reter os gases gerados. <b>Material utilizado:</b> Solo argiloso compactado com baixa permeabilidade; geomembrana; ou geocompósito bentonítico, sendo que a espessura da camada dependerá do material utilizado na sua construção.
<b>Camada de drenagem</b>	<b>Considerações gerais:</b> Necessária apenas em situações onde se verifique a infiltração de grandes quantidades de água. <b>Função:</b> Drenar, lateralmente, a água infiltrada; reduzir a carga hidráulica no interior do aterro; e proteger a camada impermeável de secagem e fissuração. <b>Material utilizado:</b> Areia ou brita; geotêxteis; ou geocompósito drenante, devendo o material utilizado apresentar-se permeável com um valor de $k \geq 1 \times 10^{-4}$ m/s.
<b>Camada de proteção</b>	<b>Considerações gerais:</b> A camada de proteção pode ser combinada com a camada de terra vegetal, adquirindo a designação de camada de material terroso. <b>Função:</b> Reter a água infiltrada; proteger as camadas inferiores contra danos, sobretudo mecânicos; e manter a estabilidade da cobertura final. <b>Material utilizado:</b> Solo adequado ou geotêxteis.
<b>Camada de terra vegetal</b>	<b>Considerações gerais:</b> Necessária para o controlo de água e proteção contra a erosão eólica. <b>Função:</b> Promover o crescimento da vegetação e a evapotranspiração; reduzir a erosão e a infiltração; minimizar os odores; beneficiar o arranjo paisagístico. <b>Material utilizado:</b> Terra vegetal não compactada e sistema de controlo de erosão (geossintéticos), sendo que a espessura pode variar entre 0,15 m e 0,6 m.

Em Portugal, à semelhança do observado noutros países, a composição do sistema de selagem final dos aterros de resíduos varia em função do grau de perigosidade dos resíduos depositados (figura 2.5).



Legenda: (a) aterro para resíduos inertes; (b) aterro para RSU e resíduos industriais banais (resíduos não perigosos); (c) aterro para resíduos industriais perigosos; (\*) a definir em função do tipo de resíduo

**Figura 2.5** Representação esquemática do sistema de selagem final dos aterros de resíduos, em acordo com o DL nº 183/2009 (adaptado de Roque, 2011b)

#### 2.3.4 - Particularidades da camada de drenagem e recolha de lixiviados

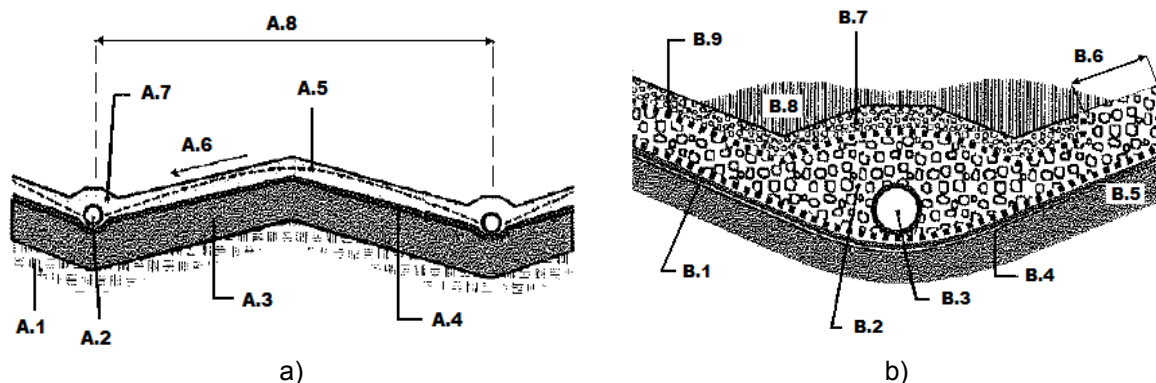
Tal como evidenciado nas duas secções anteriores, a maior parte dos aterros de resíduos integram uma camada de drenagem e uma camada de drenagem de biogás no sistema de selagem final, e uma camada de drenagem e recolha de lixiviados no sistema de proteção basal ativo, sendo estas camadas fundamentais ao adequado e eficiente funcionamento dos aterros de resíduos. Pelas razões já expostas, na presente secção apenas se detalham as particularidades da camada de drenagem e recolha de lixiviados.

Rowe *et al.* (1995 in Manassero *et al.*, 1998) referem que a construção de um sistema de drenagem e recolha de lixiviados pode ter por base uma perspectiva de “mínima geração de lixiviados”, critério seguido em Portugal, conseguida mediante a construção de um sistema de selagem final o mais impermeável possível. Contudo, uma redução da infiltração das águas pluviais tem como consequência um aumento do período de tempo, décadas a séculos, até que ocorra a geração de lixiviados sem carga poluente significativa, podendo nesse mesmo período de tempo, verificar-se a degradação e/ou a colmatção dos sistemas de drenagem (Manassero *et al.*, *op. cit.*).

A alternativa passa pela “máxima geração de lixiviados”. Neste caso, a capacidade máxima de geração de lixiviados é atingida durante um período de tempo em que é elevada a probabilidade do sistema de drenagem e recolha de lixiviados desempenhar adequadamente as suas funções. A principal desvantagem desta opção reside na grande quantidade de lixiviado a enviar para as Estações de Tratamento de Águas Lixivantes - ETAL, e na possibilidade de ocorrerem danos nos sistemas de drenagem (*ibid.*).

Desde a idealização do primeiro sistema drenagem e recolha de lixiviados foram sendo introduzidos sucessivamente novos elementos de drenagem, desenvolvidas novas configurações e adotados elementos alternativos, como é o caso dos materiais sintéticos (Rowe e Yu, 2010). O sistema padrão é constituído por uma camada drenante que comporta no seu interior uma rede de

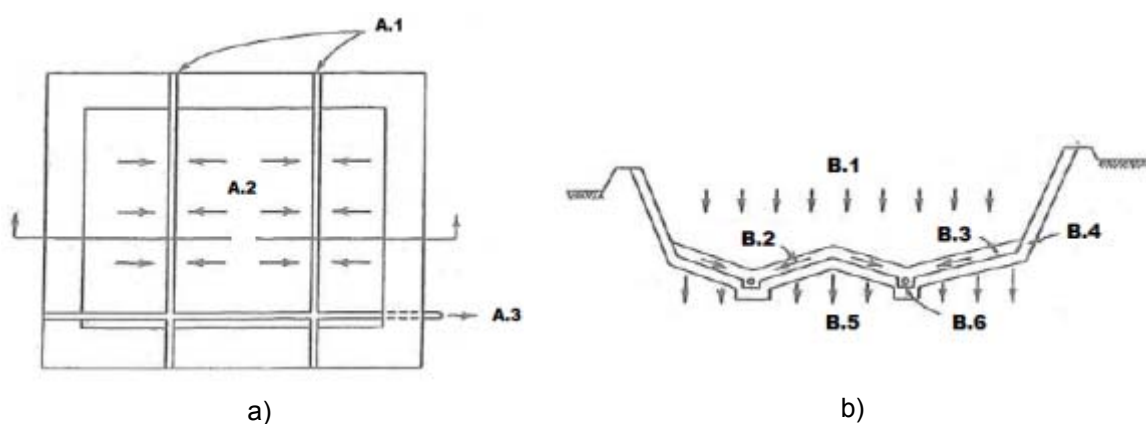
drenos longitudinais e transversais colocados estrategicamente para a captação dos lixiviados, conforme se demonstra na figura 2.6 (Levy e Cabeças, 2006).



Legenda: a) perfil do sistema de drenagem e recolha de lixiviados: (A.1) barreira geológica natural; (A.2) dreno; (A.3) barreira geológica artificial; (A.4) geomembrana; (A.5) máxima acumulação do lixiviado deve ser  $\leq 30$  cm, segundo as recomendações; (A.6) declive deve ser  $\geq 2\%$ ; (A.7) camada mineral granular; (A.8) distância entre dois drenos consecutivos deve ser  $\leq 30$  m; b) perfil do sistema de drenagem e recolha dos lixiviados: (B.1) geotêxtil não tecido; (B.2) material mineral granular de diâmetro equivalente entre 20 mm e 50 mm; (B.3) dreno; (B.4) geomembrana; (B.5) barreira geológica artificial; (B.6) zona sem geotêxtil; (B.7) material granular de diâmetro equivalente entre 16 mm e 32 mm; (B.8) resíduos; (B.9) geotêxtil não tecido

**Figura 2.6** Detalhe do sistema de drenagem e recolha de lixiviados (adaptado de Manassero *et al.*, 1998)

A configuração do sistema de drenagem e recolha de lixiviados, que se apresenta na figura 2.7, deve, por sua vez, ser projetada para assegurar uma adequada e rápida remoção dos lixiviados do corpo do aterro de resíduos, de modo a evitar cargas hidráulicas excessivas sobre as camadas subjacente e a minimizar o risco de infiltração (Lopes e Barroso, 2011a), e permitir que o referido sistema se mantenha inalterado e não seja sujeito a fenómenos de colmatação durante a fase de exploração e após o encerramento do aterro (Manassero *et al.*, 1998). Para tal, há que estimar a quantidade de lixiviado a produzir, a drenar e a coletar, assim como o desempenho a atingir por parte do sistema de drenagem e recolha de lixiviados ao longo do seu tempo de vida útil (Sharma e Lewis, 1994 *in* Manassero *et al.*, *op. cit.*).



Legenda: a) planta do sistema: (A.1) drenos; (A.2) escoamento do lixiviado; (A.3) encaminhamento do lixiviado para a ETAL; b) perfil do sistema: (B.1) lixiviado; (B.2) escoamento do lixiviado; (B.3) camada de drenagem; (B.4) barreira de segurança passiva; (B.5) fuga do lixiviado não coletado; (B.6) drenos

**Figura 2.7** Esquematização de um modelo do sistema de drenagem e recolha de lixiviados (adaptado de Manassero *et al.*, 1998)

A par da rede de drenos internos, o sistema de drenagem deve conter um conjunto de elementos de apoio que permitam a rápida condução do lixiviado à ETAL. De acordo como Levy e Cabeças (2006), este sistema deve, ainda, ser composto pelos seguintes elementos: (1) valas principais de drenagem; (2) valas secundárias de drenagem; (3) sistemas separativos e valetas de desvio de águas pluviais; (4) caixas de cabeceira e de derivação nas zonas de confluência das valas principais e secundárias, e do sistema separativo; (5) poço de junção para onde confluem os líquidos; (6) sistemas de derivação para o escoamento dos líquidos a tratar; e (7) lagoa ou tanque de regularização.

Na tabela 2.8 apresentam-se algumas considerações sobre os principais elementos constituintes do sistema de drenagem e recolha de lixiviados.

**Tabela 2.8** Principais elementos constituintes do sistema de drenagem e recolha de lixiviados (adaptado de Manassero *et al.*, 1998; Levy e Cabeças, 2006; DL nº 183/2009; Roque, 2011a)

Principal elemento estrutural		Informação relevante
<b>Camada de drenagem</b>		<p>De acordo com o DL nº 183/2009, a camada de drenagem deve apresentar uma espessura mínima de 0,5 m, um valor de <math>k \geq 1 \times 10^{-4}</math> m/s e um declive <math>\geq 2\%</math>, de modo a minimizar a probabilidade de ocorrência de colmatção da camada, por intermédio de fenómenos, físicos, químicos e biológicos, que levaria a redução da sua <math>k</math>. Deve ainda ser isenta de qualquer tipo de material calcário (teor de carbonatos deve ser inferior a 10%).</p> <p>De acordo com outras fontes bibliográficas, refira-se, ainda, que a camada de drenagem:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>deve ser constituída por: (1) uma camada mineral permeável de 0,2 m de espessura, com material mineral natural de granulometria fina a média, areia ou cascalho, que permita a drenagem do lixiviado por gravidade até aos drenos; e (2) uma camada mineral permeável de 0,30 m de espessura, com material mineral natural britado ou rolado de diâmetro equivalente entre 20 mm e 50 mm, <math>k &gt; 5 \times 10^{-4}</math> m/s e que envolva os drenos;</li> <li>o tamanho dos grãos das partículas do material a aplicar na camada de drenagem pode variar de caso para caso para se evitar a colmatção e garantir a manutenção da permeabilidade durante o tempo de vida útil do aterro - deve-se optar preferencialmente por seixos limpos; percentagem de finos de ser inferior a entre 2% e 5%; e a dimensão máxima das partículas encontra-se limitada a entre 25 mm e 50 mm - percentagem tipo: <math>D_{10} = 3</math> mm, <math>D_{30} = 12</math> mm, <math>D_{50} = 15</math> mm, <math>D_{60} = 25</math> mm e <math>D_{100} = 35</math> mm;</li> <li>a camada de drenagem deve ser projetada de modo a que a carga hidráulica sobre as camadas subjacentes seja <math>\leq 30</math> cm - por vezes, é permitido exceder o referido valor por reduzidos períodos de tempo em condições extremas;</li> <li>o material deve apresentar resistência mecânica suficiente para resistir ao atrito entre as partícula, evitando, deste modo, a formação de finos em quantidades consideráveis.</li> </ol>
<b>Drenos</b>		Os drenos de PEAD são ranhurados a meia-cana e tem diâmetro $\geq 30$ cm. O diâmetro pode, no entanto, variar entre os 15 cm e 20 cm, podendo este valores ser entre 2% e 3% inferior quando aplicados nos taludes interiores do aterro de resíduos. São colocados na base da camada de drenagem, em locais estratégicos, para maximizar a captação do lixiviado, devendo ser protegidos por material granular grosso a fim de evitar a sua colmatção.
<b>Geotêxtil não tecido</b>		O geotêxtil é aplicado sobre a camada de drenagem, envolvendo-a, sobretudo quando a mesma é composta por material granular grosso. Em alternativa, pode ser aplicado sobre os drenos. A sua principal função é funcionar como filtro e tem por objetivo proteger contra a colmatção da camada de drenagem pelos resíduos sobrejacentes.
<b>Valas</b>	<b>Principais</b>	Comportam os drenos de PEAD ranhurada a meia cana. Desenvolvem-se de acordo com a geometria modelada no fundo do aterro e têm como principal função o encaminhamento do caudal dos lixiviados para um ou mais poços de captação.
	<b>Secundárias</b>	Intersectam as valas principais, comportando, ou não, as tubagens de PEAD ranhurada de meia cana. Apresentam um formato sensivelmente trapezoidal, com uma altura de 1 m, e largura base de 0,5 m, sendo preenchidas em toda a sua secção com material granular britado.
<b>Poço</b>		Executado em manilhas pré-fabricadas de betão, reforçadas e armadas, com um diâmetro interior de cerca de 1,5 m e tem por objetivo coletar os lixiviados para posterior encaminhamento para a ETAL. Durante o crescimento do poço em altura, este deve ser envolvido por um anel com 0,5 m de largura em brita e protegido em toda a sua envolvente por um geotêxtil não tecido.



## **2.3.5 - Produção e caracterização dos lixiviados**

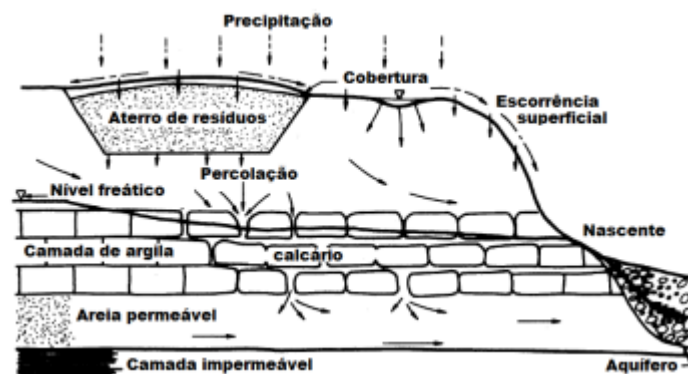
### **2.3.5.1 - Produção de lixiviados e fatores intervenientes**

Os lixiviados são compostos essencialmente pelas águas de origem externa, como sejam as pluviais e as de escoamento superficial, mas também “(...) pelo teor em água contida nos resíduos e pela água que se liberta como consequência das reações de decomposição dos mesmos” (Tchobanoglous *et al.*, 1993 *in* Martinho *et al.*, 2008a). A percolação da água pelos resíduos em decomposição lixivia os constituintes orgânicos e inorgânicos resultantes das reações de biodecomposição (Gomes, 2008), transformando o lixiviado numa matriz aquosa de extrema complexidade em virtude, de na sua composição, constarem altos teores em compostos orgânicos e inorgânicos, nas formas dissolvida e coloidal (Christensen *et al.*, 2001 e Kjeldsen *et al.*, 2002, *in* Da Silva, 2009), e em substâncias tóxicas provenientes dos resíduos industriais depositados, bem como altos teores de azoto amoniacal (Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2009). O potencial poluente do lixiviado, sobretudo nos primeiros anos de exploração do aterro de resíduos, é significativo, facto que lhe confere o poder de causar efeitos nefastos nos lençóis freáticos e nas águas superficiais próximas aos aterros (Pereira e Coelho, 2000), caso este efluente não seja adequadamente confinado, drenado, tratado, monitorizado e encaminhado para o meio ambiente de forma controlada e cuidada (Levy e Cabeças, 2006; Da Silva, *op. cit.*).

A quantidade de lixiviado produzido durante a vida útil e após o encerramento de um aterro de resíduos pode, de acordo com Manassero *et al.* (1998), Qasim e Chaing (1994 *in* Machado, 2004), Gomes (*op. cit.*) e UNISINOS (*op. cit.*), variar em função de diversos fatores, tais como: (1) a precipitação, essencialmente durante a fase de exploração, a evapotranspiração e a temperatura; (2) a topografia e a geologia da área onde o aterro se encontra construído; (3) as características do sistema de selagem final do aterro em termos de vegetação e de declive; (4) o tipo de resíduos depositados, o pré-tratamento a que são sujeitos, a sua compactação, a sua permeabilidade, a sua granulometria, a sua massa volúmica e a sua fase de decomposição; e (5) o método de deposição. A identificação e a análise destes condicionalismos são fundamentais para a correta conceção de um aterro de resíduos, designadamente para o dimensionamento dos sistemas de proteção basal e de selagem final, e das ETAL (Manassero *et al.*, *op. cit.*), conforme comprovam os resultados obtidos nos estudos desenvolvidos por Ehrig (1983 e Sarsby, 2000 *in* Gomes, *op. cit.*). Ehrig (1983) verificou uma diminuição de cerca de 50% do volume de lixiviado produzido aquando da compactação dos resíduos com equipamentos pesados em detrimento de equipamentos leves, enquanto que, Sarsby (2000) observou que a produção de lixiviados pode variar entre 15% e 55% em função das características do aterro e das condições climáticas.

A estimação da quantidade de lixiviado produzido é comumente realizada com base no balanço hídrico, no qual se considera o volume de água que se infiltra e que sai do corpo no aterro durante um determinado intervalo de tempo (Gomes, *op. cit.*; Qasim e Chiang, 1994 *in* Martinho *et al.*, *op. cit.*a), conforme se demonstra na figura 2.8. Para o sucesso do processo de estimação é assim

fundamental o conhecimento dos valores de precipitação média anual, de evapotranspiração potencial e do coeficiente de escoamento superficial (Martinho *et al.*, 2008a).



**Figura 2.8** Movimentos de infiltração e lixiviação num aterro (adaptado de Pereira, [sd])

### 2.3.5.2 - Características dos lixiviados

As propriedades físicas, químicas e biológicas dos lixiviados podem variar consideravelmente de aterro para aterro, bem como entre diferentes épocas do ano (Reinhart e Grosh, 1998 *in* UNISINOS, 2009), dado dependerem de diversos condicionalismos como: o regime pluviométrico (Gorgati e Lucas, 2002 *in* Da Silva, 2009); a temperatura e humidade relativa no interior do aterro de resíduos (Levy e Cabeças, 2006; Da Silva, *op. cit.*; UNISINOS, *op. cit.*); a origem e composição das águas de circulação e das águas pluviais (Pereira e Coelho, 2000; Levy e Cabeças, *op. cit.*); a idade do aterro (Levy e Cabeças, *op. cit.*; Lin e Chang, 2000 *in* Da Silva, *op. cit.*; Gomes, 2008; UNISINOS, *op. cit.*); o tipo de operações realizadas durante a fase de exploração do aterro (Pereira e Coelho, *op. cit.*; Martinho *et al.*, *op. cit.*; UNISINOS, *op. cit.*); e a natureza dos resíduos depositados (Pereira e Coelho, *op. cit.*; Christensen *et al.*, 2001, e Bertazzoli e Pelegrini, 2002 *in* Da Silva, *op. cit.*). UNISINOS (*op. cit.*) considera que, destes, a natureza, a composição e a decomposição dos resíduos depositados assumem-se como os fatores que mais influenciam as propriedades dos lixiviados.

Neste contexto importa referir que os processos de alteração da matéria orgânica dos resíduos podem ser divididos "(...) em processos de decomposição em que a matéria é transformada em gases e em lixiviado por ação de microrganismos (...)" perante determinadas condições de humidade e de temperatura, e "(...) em processos de degradação em que os complexos orgânicos são transformados noutros mais simples através de reações bioquímicas" (Gomes, *op. cit.*). A decomposição da fração orgânica dos resíduos, que "(...) inclui processos de digestão aeróbia e anaeróbia, respetivamente, na presença e na ausência de oxigénio" (*ibid.*), trata-se de um mecanismo complexo que varia ao longo do tempo de vida útil de um aterro de resíduos e que ocorre por meio da combinação de um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos (Souto, 2009). A sua compreensão é fundamental para a definição de um conjunto de fases que, de acordo com Lima (1988 *in* Colmanetti, 2000), Martinho *et al.* (*op. cit.*), e Souto (*op. cit.*), dividem o processo evolutivo de um aterro de resíduos em: (1) fase aeróbia; (2) fase anaeróbia ácida; (3) fase metanogénica instável; (4) fase metanogénica estável; e (5) fase de maturação final. O termo "instável" na fase

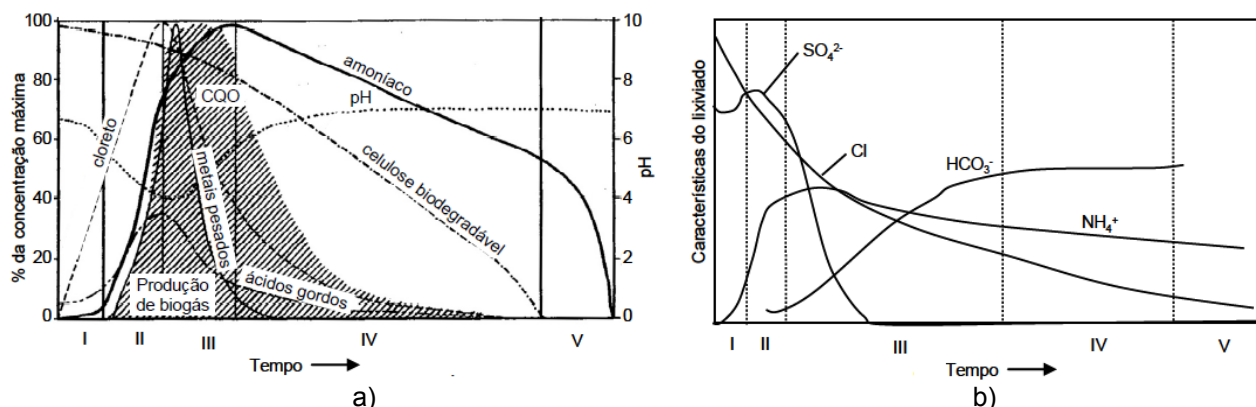
“metanogénica instável” é utilizado para fazer-se referência “(...) à possibilidade de inibições temporárias da produção de metano em função de mudanças ambientais” (Souto, 2009).

As fases dos aterros de resíduos não devem ser confundidas com as fases de decomposição. Apesar da semelhança entre ambas em alguns termos, as fases dos aterros estão associadas às características dos efluentes produzidos, lixiviado e biogás, ao passo que as fases de decomposição estão associadas ao processo de conversão de moléculas da matéria orgânica em substâncias mais simples, fornecendo matéria e energia para as comunidades microbianas (*ibid.*). A decomposição da fração orgânica dos resíduos como um processo que pode ser agrupado em três fases principais: aeróbia, anaeróbia ácida e anaeróbia metanogénica (McBean *et al.*, 1995 *in* Gomes, 2008) ou em cinco fases: ajustamento inicial, transição, acidificação, metanogénica e maturação ou estabilização (Pohland *et al.*, 1985 e Tchobanoglous *et al.*, 1993 *in* De Matos, 2008; Williams, 1998 e Sarsby, 2000 *in* Gomes, *op. cit.*). Esta última abordagem é a mais recorrente quando se pretende associar a variação das características dos lixiviados produzidos em aterro com o processo de decomposição dos resíduos depositados.

A duração da fase aeróbia é geralmente inferior a um mês, que corresponde ao tempo de consumo do oxigénio disponível nos resíduos depositados (Gomes, *op. cit.*). O facto de ser uma fase rápida, explica a reduzida parcela de resíduos decompostos e, conseqüentemente, a reduzida produção de lixiviado (*ibid.*). Nestes casos, o lixiviado é composto por material particulado arrastado pela percolação da água, por sais solúveis e por pequenas quantidades de matéria orgânica solúvel. “A conversão e estabilização dos resíduos progride sequencialmente para as fases anaeróbia ácida, metanogénica instável, metanogénica estável e maturação (...)” (Martinho *et al.*, 2008a). Nesta última fase, as condições para a formação de produtos de decomposição diminuem e observa-se a estabilização do aterro (Gomes, *op. cit.*). A duração de cada uma das fases “(...) varia de aterro para aterro e em função da distribuição dos componentes orgânicos, da disponibilidade de nutrientes, do teor em água, dos níveis de percolação e do grau de compactação inicial” (*ibid.*) Num aterro de resíduos “(...) é usual verificar-se a ocorrência, em simultâneo, das várias fases de decomposição, a diferentes profundidades ou em distintas zonas do aterro” (*ibid.*). No entanto, existe uma predominância das fases anaeróbias nos primeiros anos após o encerramento do aterro, que se mantém até se esgotarem os componentes orgânicos disponíveis. Ao aumento da idade do aterro está normalmente associado uma diminuição das taxas de produção de biogás e uma variação da sua composição, bem como da composição dos lixiviados (*ibid.*).

As reações que ocorrem durante as fases do aterro tornam os constituintes dos resíduos mais suscetíveis ao arrastamento pelo lixiviado. Por conseguinte, o lixiviado apresentará distintas características consoante a idade do aterro, facto demonstrado por Ehrig *et al.* (1993 *in* por Russo, 2005) com base em estudos realizados em 15 aterros de resíduos existentes na Alemanha durante um intervalo de tempo entre 1 e 5 anos. Os resultados obtidos indicam que alguns dos parâmetros doseados nos lixiviados, tais como a Carência Bioquímica de Oxigénio a 5 dias e a 20 °C - CBO<sub>5</sub>, a Carência Química de Oxigénio - CQO, e os metais pesados, variam em função do avanço da decomposição dos resíduos no aterro.

Na figura 2.9 apresenta-se a variação de alguns parâmetros químicos do lixiviado em função das fases em que se encontra o aterro de resíduos.



Legenda: (I) fase aeróbia; (II) fase aeróbia ácida; (III) fase metanogénica instável; (IV) fase de metanogénica instável; (V) fase de maturação final

**Figura 2.9** Variação da concentração de alguns parâmetros químicos dos lixiviados em função da fase em que se encontra o aterro de resíduos (adaptado de Gomes, 2008)

Em conclusão, os lixiviados são constituídos por “(...) uma mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas (...)”, como ácidos inorgânicos de elevada agressividade e corrosividade, por “(...) compostos em solução e em estado coloidal, por diversas espécies (...)” de microrganismos (Andrade, 2002 *in* UNISINOS, 2009) e, ainda, por metais pesados em quantidades consideráveis que lhes conferem elevados custos de tratamento na fase de exploração dos aterros de resíduos. São também muito ricos em sais, essencialmente cloretos (Cl⁻) e sulfatos (SO₄²⁻).

De um modo mais detalhado e de acordo com Christensen *et al.* (2001 *in* Da Silva, 2009) e Kjeldsen *et al.* (2002 *in* UNISINOS, *op. cit.*), os lixiviados podem conter os seguintes cinco grupos de poluentes: (1) Material Orgânico Dissolvido - MOD, expresso pela carência bioquímica de oxigénio - CBO, CQO ou COT, que inclui ácidos fúlvicos e húmicos; (2) macro poluentes inorgânicos como:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ; (3) metais pesados como:  $Cd^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ; (4) Compostos Orgânicos Xenobióticos - COXs, originários de resíduos domésticos e químicos presentes em baixas concentrações, incluindo hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos alifáticos clorados; e (5) outros componentes, em concentrações reduzidas, como: boro (B), arsénio (As), bário (Ba), selénio (Se), mercúrio (Hg) e cobalto (Co).

As concentrações dos metais presentes no lixiviado dependem do tipo de resíduo depositado no aterro, sendo menor nos resíduos domésticos que nos industriais. São, ainda, função da fase de decomposição do resíduo, sendo superiores durante a fase de fermentação ácida, quando estes elementos estão mais solúveis, comparativamente às últimas fases de estabilização, quando o pH normalmente é mais alcalino (Christensen *et al.*, 2001 e Silva, 2002 *in* Da Silva, *op. cit.*). A longo prazo, com a penetração de oxigénio na massa dos resíduos depositados, a oxidação da matéria orgânica por decompor e a oxidação do enxofre (S), do azoto (N) e do ferro (Fe) podem dar origem a uma diminuição do valor de pH e a um aumento de Eh, conduzindo à libertação de metais pesados (De Matos, 2008).

Na tabela 2.9 apresentam-se os valores típicos para aterros de RSU de diferentes idades. Os valores dos parâmetros apresentados variam consideravelmente com a idade dos aterros, conforme demonstram os valores expostos por Tchobanoglous *et al.* (1993 in Gomes, 2008), sendo contudo possível a definição de valores típicos para cada parâmetro, como demonstra Levy e Cabeças (2006).

**Tabela 2.9** Composição dos lixiviados

Parâmetro		Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993 in Gomes, 2008)		Levy e Cabeças (2006)	
		Aterro jovem (<2 anos)	Aterro antigo (>10 anos)	Aterro de resíduos	
		Intervalo de valores	Intervalo de valores	Intervalo de valores	Valor típico
<i>pH</i>	-	4,5 - 7,5	6,6 - 7,5	5,3 - 8,5	6
<i>CBO<sub>5</sub></i>	(mg/l)	2000 - 30000	100 - 200	500 - 5000	2000
<i>CQO</i>		3000 - 60000	100 - 500	2000 - 45000	10000
<i>COT</i>		1500 - 20000	80 - 160	1300 - 20000	6000
<i>SST</i>		200 - 2000	100 - 400	200 - 1000	500
<i>Azoto orgânico</i>		10 - 800	80 - 120	10 - 6000	200
<i>Azoto amoniacal</i>		10 - 800	20 - 40	300 - 3000	1500
<i>Nitratos, NO<sup>3-</sup></i>		5 - 40	5 - 10	5 - 40	25
<i>Fósforo total, P</i>		1 - 100	5 - 10	1 - 70	30
<i>Ortofosfatos</i>		4 - 80	4 - 8	1 - 50	20
<i>Alcalinidade em CaCO<sub>3</sub></i>		1000 - 10000	200 - 1000	1000 - 10000	3000
<i>Dureza total em CaCO<sub>3</sub></i>		300 - 10000	200 - 500	300 - 10000	3500
<i>Cálcio, Ca</i>		200 - 3000	100 - 400	200 - 3000	1000
<i>Magnésio, Mg</i>		50 - 1500	50 - 200	50 - 1500	250
<i>Potássio, K</i>		200 - 1000	50 - 400	200 - 2000	300
<i>Sódio, Na</i>		200 - 2500	100 - 200	200 - 2000	500
<i>Cloretos, Cl</i>		200 - 3000	100 - 400	100 - 3000	500
<i>Sulfatos, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>		50 - 1000	20 - 50	100 - 1500	300
<i>Ferro Total, Fe</i>		50 - 1200	20 - 200	50 - 600	60

Legenda: Sólidos Suspensos Totais - SST

## 2.4 - Resíduos selecionados

### 2.4.1 - RCD

#### 2.4.1.1 - Considerações gerais

A construção civil é uma atividade, que além ser uma das principais consumidoras de recursos naturais, tem a si associada a produção de um volume significativo de resíduos sólidos (Freire *et al.*, 2011) em resultado, por um lado, do desperdício de materiais novos incorporados e, por outro, dos materiais derivados das operações de demolição a que é necessário proceder na maior parte das construções (Martinho *et al.*, 2008b). Só nas últimas décadas, porém, as principais entidades do sector da construção civil despertaram para o problema decorrente dos passivos ambientais resultantes da sucessiva deposição de RCD produzidos concomitantemente à inexistência de medidas práticas com vista à promoção do processamento daqueles resíduos a fim da sua correta reutilização e reciclagem em diversas áreas de aplicação. A despreocupação evidenciada até então deveu-se provavelmente ao facto dos RCD serem constituídos maioritariamente por resíduos inertes,

p. ex.: betão e argamassas, materiais cerâmicos, vidro, materiais ferroso e não ferrosos, e materiais betuminosos (*Franklin Associates*, 1998).

A necessidade de reduzir os volumes de RCD produzidos mediante a concretização de medidas práticas de gestão, como a sua reutilização e reciclagem, assume particular relevância devido a razões económicas e ambientais, como sejam: (1) a redução do consumo de recursos naturais (*Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure* - SAMARIS, 2004; BT/PCC/436, 2006; Salinas, 2002 in Gonçalves, 2007; *Institut Bruxellios pour la Gestion de l'Environnement* - IBGE, 2006 in UBA, 2008; Freire *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2010), e as taxas de poluição (Salinas, 2002 in Gonçalves, *op. cit.*; Pestana, 2008) e a poupança de custos e de energia inerentes ao seu processo extrativo (SAMARIS, *op. cit.*; Pestana, *op. cit.*; Zhao *et al.*, *op. cit.*); (2) a necessidade de se prologar o tempo de vida útil dos aterros de resíduos face à redução de espaços disponíveis para a sua construção; e (3) os custos associados às operações de controlo do fluxo de resíduos enviados para destino final (BT/PCC/436, *op. cit.*; Pestana, *op. cit.*; Ferreira, 2009; Freire *et al.*, 2011).

No presente estudo, pretende-se avaliar a viabilidade técnica da utilização de um agregado reciclado resultante do processamento de RCD numa aplicação específica, como mencionado na secção 1.2, contribuindo assim para fomentar a opção pela sua valorização em detrimento do seu envio para aterro. Neste contexto, são tratados na presente secção os aspetos mais relevantes relacionados com os RCD, no intuito de enquadrar esta temática no trabalho apresentado nesta dissertação.

Na secção 2.4.1.2 é feita referência ao processo de produção de RCD, seguido da apresentação dos seus vários tipos de classificação, secção 2.4.1.3, e de alguns dados estatísticos referentes à sua produção a nível nacional e internacional, respetivamente, secção 2.4.1.4.1 e secção 2.4.1.4.2.

Na secção 2.4.1.5, o termo RCD é substituído pela designação “resíduos de construção e demolição reciclados” - RCD-R, termo atribuído aos RCD processados, uma vez que o tipo de material utilizado no presente estudo resulta de um processamento prévio dos RCD. Por sua vez, atendendo ao tipo de agregado selecionado, as propriedades ambientais, químicas, mineralógicas, geométricas, físicas e mecânicas dos RCD-R apresentadas incidem essencialmente sobre o  $AB_{RCD}$  que, em acordo com a definição apresentada na secção 1.2, corresponde a um agregado de betão britado de RCD. O exposto na secção 2.4.1.5 será utilizado sempre, que apropriado, na análise dos resultados obtidos com o  $AB_{RCD}$  selecionado para o presente estudo, que se apresenta adiante no capítulo 3.

Na última secção, 2.4.1.6, são apresentadas as potências aplicações dos RCD-R na construção civil.

#### **2.4.1.2 - Origem dos RCD**

Na bibliografia identificaram-se várias definições para o termo RCD, tais como as apresentadas por: *Franklin Associates* (1998); *Leite* (2001); *Ministry of water, land and air protection of British Columbia - MWLA-BC* (1993 in *BT/PCC/436*, 2006); *Environmental protection department - EPD* (1998 in *Deng et al.*, 2008); *European environment agency - EEA* (2009); DL nº 73/2011; *Ministry of communications of the P.R. China* (2005 in *Zhao et al.*, 2010), não se verificando, contudo, total concordância entre as mesmas, nomeadamente no que respeita aos elementos constituintes daqueles resíduos. Para a presente dissertação, refere-se, a nível internacional, a apresentada pela EEA (*op. cit.*), que define os RCD como “(...) entulho e outros resíduos provenientes da construção, demolição, renovação ou reconstrução de edifícios ou de partes destes, quer ao nível da superfície ou quer do subsolo”, e, a nível nacional, a apresentada pelo DL nº 73/2011 que descreve os RCD como sendo um tipo de “resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação, demolição e da derrocada de edificações”.

Em certas definições de RCD, os resíduos resultantes de obras de escavação, nomeadamente os solos, são excluídos por se tratarem de um tipo de material que não resulta diretamente das atividades de construção (*BT/PCC/436, op. cit.*). Ainda assim, a definição proposta pela EEA (*op. cit.*) inclui-os, ao passo que o DL nº 46/2008 viabiliza a sua reutilização “(...) no trabalho de origem de construção, reconstrução, ampliação, alteração, reparação, conservação, reabilitação, limpeza e restauro, bem como em qualquer outro trabalho de origem que envolva processo construtivo, (...) na recuperação ambiental e paisagística de explorações mineiras e de pedreiras e na cobertura de aterros destinados a resíduos (...)” desde que não contenham substâncias perigosas.

Conforme se pode deduzir das definições apresentadas no início desta secção, os RCD provêm de várias origens, pelo que todo o tipo de operações realizadas desde a demolição das estruturas até processamento dos RCD pode comportar diversas variantes. No caso particular do processo de demolição, este pode decorrer a partir de uma de duas metodologias conhecidas para o efeito, demolição convencional ou demolição seletiva.

A demolição convencional não atende a qualquer tipo de critério ou restrição, tendo como único propósito a derrocada das estruturas edificadas (*Lourenço, 2007*). Os RCD resultantes são muito heterogéneos, sendo o processo de triagem realizado após a demolição global da estrutura (*Pestana, 2008*).

A demolição seletiva, por seu turno, apesar de ser uma metodologia mais demorada e onerosa comparativamente com a demolição convencional, acarreta um conjunto de vantagens (*LNEC E 473 (2009)*), tais como a maior qualidade e possibilidade de aplicação dos RCD-R (*Pestana, op. cit.*). Este tipo de demolição desempenha um papel fundamental para que os materiais provenientes da operação de demolição cheguem nas condições apropriadas às centrais de reciclagem (*Gonçalves, 2007*) e é definido como sendo “(...) um conjunto de operações realizadas de forma gradual e coordenada, dirigidas a fomentar o máximo aproveitamento dos materiais (...)” que constituem os RCD, “(...) minimizando assim a fração destinada a aterro” (*Fundación Labien, 2004*).

De acordo com *Fundación Labien* (2004), a materialização do método de demolição seletiva compreende duas fases:

- a. fase preliminar;
- b. fase de demolição.

Na fase preliminar procede-se ao planeamento das operações de demolição, tendo este início com a realização de um estudo sobre a estrutura a demolir e os seus condicionalismos, tais como: os resíduos provenientes da demolição; as estruturas contíguas à estrutura a demolir; o tráfego automóvel e pedonal; a população; e o meio ambiente. Posto isto, segue-se a identificação dos resíduos a provirem das operações de demolição e dos seus destinos finais, e a seleção da metodologia, dos meios humanos e dos equipamentos para a concretização das operações de demolição da infraestrutura (Almeida, 2011). É de salientar que este planeamento deverá constar no relatório do projeto de demolição, a elaborar igualmente na fase preliminar (*Fundación Labien, op. cit.*).

Concluída a primeira fase, dá-se início à fase de demolição começando-se pelas operações de limpeza e desmantelamento de todos os elementos edificados não estruturais, com recurso a processos manuais ou semi-mecânicos, ou seja, procede-se à desmontagem, ao desmantelamento e à remoção “(...) de todos os elementos passíveis de serem recuperados, reutilizados, reciclados e valorizados (p. ex.: metais, madeiras, plásticos e vidros, entre outros), ou de outros que pelas suas características se classifiquem como tóxicos ou perigosos (p. ex.: lâmpadas fluorescentes e materiais contendo amianto, entre outros) e que possam, por isso, vir a contaminar o produto final da demolição (fração inerte)” (Fortunato *et al.*, 2009). Os elementos como o plástico, a madeira, o vidro e os metais são encaminhados para entidades recicladores, sempre que seja possível proceder-se à sua recolha seletiva e que as suas características permitam a sua aceitação no destino final, ou são enviados para aterro de resíduos com vista à sua eliminação, caso a sua reutilização e reciclagem não sejam consideradas opções de valorização viáveis (*ibid.*). “A recolha dos resíduos é feita habitualmente em contentores metálicos de várias capacidades, conducentes com as necessidades da obra e da oferta do mercado”, e, em trabalhos que impliquem grandes fluxos de resíduos de dimensões consideráveis, recorre-se a camiões basculantes para o seu posterior transporte (Martinho *et al.*, 2008b).

Terminadas as operações de limpeza e desmantelamento, é dado início à demolição com as operações a decorrerem segundo a filosofia dos “quatro R” (Costa *et al.*, 2005; Fortunato *et al.*, *op. cit.*), implementando-se *in situ* sistemas de recolha seletiva de RCD, com vista à sua máxima valorização (Costa *et al.*, *op. cit.*). As operações são conduzidas de forma metódica e sequencial, das cotas mais altas para as mais baixas, com o propósito de que, no decorrer da demolição, a construção se encontre numa situação de auto-suporte (Almeida, *op. cit.*).

De acordo com Fortunato *et al.* (*op. cit.*), de entre as várias técnicas de demolição conhecidas, as mais vulgarmente utilizadas são: manuais (figura 2.10a); mecânicas (figura 2.10b); por implosão/expansão; ou outras mediante a utilização de serras de disco e de fio diamantado, de jacto de água ou de lança térmica. A diferença entre estas reside, essencialmente, nos objetivos da sua utilização, nos princípios do seu funcionamento e nos equipamentos associados (*ibid.*).





**Figura 2.10** Técnica de demolição: a) manual (adaptado de Almeida, 2011); b) mecânica

A demolição mecânica, a mais comum das quatro técnicas anteriormente referidas, resulta da ação do peso da máquina, e/ou de um “(...) impacto, provocando-se assim a destabilização das estruturas e o seu desmoronamento” (Fortunato *et al.*, 2009). Em algumas situações, são também utilizadas “(...) máquinas giratórias com lanças de longo alcance e grande força motriz, equipadas na sua extremidade com ferramentas especificamente desenhadas para a demolição (...)”, as quais permitem “(...) uma demolição rápida, eficiente e em conformidade com as exigências ambientais, como sejam baixos níveis de vibração, ruído e poluição atmosférica” (*ibid.*).

Em Portugal, de acordo com Pestana (2008), a opção pela demolição seletiva tem por objetivo viabilizar a aplicação imediata dos RCD, e só perante outros cenários, se recorre à demolição convencional.

#### **2.4.1.3 - Classificação dos RCD**

Os RCD são classificados com base na sua origem, na sua composição e no seu destino final (Gonçalves, 2007), sendo possível, mediante a conjugação destas classificações, que se detalham nas secções seguintes, proceder-se a uma correta identificação dos seus vários elementos constituintes.

##### **2.4.1.3.1 - Com base na origem**

Os RCD são classificados com base na sua origem em três classes: (1) resíduos de construção; (2) resíduos de demolição; e (3) resíduos de remodelação, reabilitação e renovação (Gonçalves, *op. cit.*; *Demolition Waste*, 1980 in Lourenço, 2007; Pestana, *op. cit.*; Ferreira, 2009). Cada uma destas classes encontra-se particularizada na tabela 2.10, sendo importante salientar que as classes “resíduos de construção” e “resíduos de remodelação, reabilitação e renovação” consideram os solos e as rochas como elementos constituintes dos RCD, o que contraria a definição de RCD apresentada no DL nº 73/2011.

**Tabela 2.10** Classificação de RCD em função da sua origem (adaptado de Gonçalves, 2007; *Demolition Waste*, 1980 in Lourenço, 2007; Pestana, 2008; Ferreira, 2009)

Classe	Informação relevante
<b>Construção</b>	<p><b>Considerações gerais:</b> Resíduos provenientes do excesso de materiais aquando da construção, de desperdícios associados ao processo construtivo, de materiais substituídos devido a possíveis danos dos mesmos e das embalagens dos materiais. A sua variabilidade deve-se ao facto de em obra serem utilizados vários tipos de materiais. Apresentam menor grau de contaminação e maior potencial de reciclagem comparativamente com os resíduos de demolição.</p> <p><b>Obra:</b> Movimentação de terras, desperdícios e restos de materiais de trabalhos de construção.</p> <p><b>Tipo de resíduo:</b> Na sua maioria, solos e rocha (figura 2.11a), desperdícios de tijolos e outros materiais cerâmicos, restos de betão e aço, madeira, embalagens e tintas.</p>
<b>Demolição</b>	<p><b>Considerações gerais:</b> Resíduos resultantes da demolição de edifícios e outras estruturas, sendo na sua maioria, inertes. A composição é função do tipo de obra demolida, da localização geográfica da obra, do tipo de utilização funcional do edifício e do grau de seletividade aplicado durante o processo de demolição.</p> <p><b>Obra:</b> Edifícios residenciais e não residenciais, infraestruturas viárias e obras de arte associadas.</p> <p><b>Tipo de resíduo:</b> Na sua maioria alvenarias, betão armado (figura 2.11b) e pré-esforçado, metais ferrosos e não ferrosos. Em menores quantidades: madeira; vidro; materiais cerâmicos; produtos de gesso e estuque; materiais de isolamento e plásticos; entre outros.</p>
<b>Remodelação, reabilitação e renovação</b>	<p><b>Considerações gerais:</b> Resíduos que envolvem uma menor quantidade de resíduos por obra. A sua composição depende do tipo de reparação. Assemelham-se mais aos resíduos de demolição que aos resíduos de construção.</p> <p><b>Obra:</b> Remodelação e reabilitação de edifícios, e manutenção de infraestruturas rodoviárias.</p> <p><b>Tipo de resíduo:</b> Semelhantes aos resíduos de demolição: betão; alvenaria; solos; e materiais betuminosos.</p>



a)



b)

**Figura 2.11** Duas fileiras de resíduos de RCD: a) solos e rochas (adaptado de Barandas, 2009); b) betão armado

As tabelas 2.11 e 2.12 mostram algumas estimativas publicadas sobre os RCD, tendo os respetivos autores tido como critério de estudo, a origem daqueles resíduos.

**Tabela 2.11** Estimativas da quantidade de RCD produzidos em função da sua origem

Origem		WCD (2005 in Gonçalves, 2007)	Statistics Norway (2012)	Bossink e Brouwers (1996 in Mália, 2010)	Ruivo e Veiga (2004)	Franklin Associates (1998)
		Dinamarca	Noruega	Europa ocidental	UE	EUA
Construção	(% )	33,6	33,6	20	5 - 10	8
Demolição		31,3	31,3	80	70 - 75	44
Remodelação		35,1	35,1		20 - 25	48

Legenda: Waste Centre Denmark - WCD

**Tabela 2.12** Estimativa da composição dos RCD produzidos na Noruega em função da sua origem (adaptado de *Statistics Norway*, 2012)

Composição		Construção (b)	Demolição (b)	Remodelação	Total (b)
<b>Betão e tijolos</b>		16,4	68,7	35,7	39,6
<b>Betão e tijolos contaminados</b>		-	2,7	1,1	1,2
<b>Madeira</b>		17,6	10,3	14,9	14,3
<b>Metal</b>		3,5	3,9	6,3	4,6
<b>Gesso</b>		5,6	0,4	4,5	3,6
<b>Papel, cartão e plásticos</b>	(%)	2,7	0,3	1,9	1,7
<b>Vidro</b>		0,4	0,2	0,8	0,5
<b>Asfalto</b>		31,4	3,4	6,0	13,7
<b>Mistura de resíduos</b>		20,8	7,9	24,1	17,9
<b>Resíduos perigosos (a)</b>		0,4	1,2	1,2	0,9
<b>Resíduos EEEl</b>		0,4	0,3	1,0	0,6
<b>Outros</b>		0,7	0,6	2,5	1,3

Legenda: Elétricos e Equipamentos Eletrônicos - EEEl; (a) asbesto, madeira impregnada e outros tipos de resíduos perigosos não especificados pela fonte; (b) valor total aproximadamente igual a 100%

#### 2.4.1.3.2 - Com base na composição

Com base na composição, os RCD são classificados em três classes: (1) resíduos orgânicos; (2) resíduos compósitos; e (3) resíduos inertes, conforme se particulariza na tabela 2.13 (*Franklin Associates*, 1998). À semelhança do mencionado na secção 2.4.1.3.1, esta classificação e as que a seguir se apresentam nesta secção consideram os solos e as rochas como elementos constituintes dos RCD.

**Tabela 2.13** Classificação de RCD em função da sua composição (adaptado de *Franklin Associates*, 1998)

Classe	Composição
<b>Resíduos orgânicos</b>	Papel, cartão, madeira e plásticos.
<b>Resíduos compósitos</b>	Tapetes, revestimentos de paredes de gesso, material elétrico, madeira prensada e madeira envernizada.
<b>Resíduos inertes</b>	Betão, betão armado, tijolos, telhas, azulejos, porcelanas, vidro, metais ferrosos, metais não ferrosos, asfalto, pedra e solo.

Como complemento, apresenta-se também a classificação proposta por Rodríguez *et al.* (2007), a LER e as especificações LNEC E 473 (2009) e LNEC E 474 (2009).

Rodríguez *et al.* (*op. cit.*) classificam os RCD em três classes: (1) resíduos inertes, nos quais se incluem os materiais cerâmicos, o betão, as pedras, e os solos, entre outros; (2) resíduos não perigosos, tais como o vidro, papelão e RSU; e (3) resíduos perigosos como sejam o amianto, os solventes e as colas, entre outros.

A LER, por seu turno, agrupa os resíduos em 20 capítulos, pertencendo os RCD ao capítulo 17. Como mostra a tabela 2.14, o capítulo está subdividido em 8 subcapítulos, distinguindo os resíduos perigosos dos restantes com um asterisco.

**Tabela 2.14** Listagem dos constituintes de RCD, incluindo solos escavados de locais contaminados, pertencentes ao capítulo 17 da LER

<b>17 01 Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos</b>	17 01 01 Betão. 17 01 02 Tijolos. 17 01 03 Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos. 17 01 06 (*) Misturas ou frações separadas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos contendo substâncias perigosas. 17 01 07 Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos não abrangidas em 17 01 06.
<b>17 02 Madeira, vidro e plástico</b>	17 02 01 Madeira. 17 02 02 Vidro. 17 02 03 Plástico. 17 02 04 (*) Vidro, plástico e madeira contendo ou contaminados com substâncias perigosas.
<b>17 03 Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão</b>	17 03 01 (*) Misturas betuminosas contendo alcatrão. 17 03 02 Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01. 17 03 03 (*) Alcatrão e produtos de alcatrão.
<b>17 04 Metais (incluindo ligas)</b>	17 04 01 Cobre, bronze e latão. 17 04 02 Alumínio. 17 04 03 Chumbo. 17 04 04 Zinco. 17 04 05 Ferro e aço. 17 04 06 Estanho. 17 04 07 Mistura de metais. 17 04 09 (*) Resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas. 17 04 10 (*) Cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas. 17 04 11 Cabos não abrangidos em 17 04 10.
<b>17 05 Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem</b>	17 05 03 (*) Solos e rochas contendo substâncias perigosas. 17 05 04 Solos e rochas não abrangidas em 17 05 03 (*). 17 05 05 (*) Lamas de dragagem contendo substâncias perigosas. 17 05 06 Lamas de dragagem não abrangidas em 17 05 05. 17 05 07 (*) Balastros de linhas de caminho de ferro contendo substâncias perigosas. 17 05 08 Balastros de linhas de caminho de ferro não abrangidos em 17 05 07.
<b>17 06 Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto</b>	17 06 01 (*) Materiais de isolamento contendo amianto. 17 06 03 (*) Outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas. 17 06 04 Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03. 17 06 05 (*) Materiais de construção contendo amianto.
<b>17 08 Materiais de construção à base de gesso</b>	17 08 01 (*) Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas. 17 08 02 Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01.
<b>17 09 Outros RCD</b>	17 09 01 (*) RCD contendo mercúrio. 17 09 02 (*) RCD contendo PCB (p. ex., vedantes com PCB, condensadores com PCB). 17 09 03 (*) Outros RCD (incluindo misturas de resíduos) contendo substâncias perigosas. 17 09 04 Mistura de RCD não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03.

Legenda: (\*) resíduos considerados perigosos

Já em relação às especificações LNEC E 473 (2009) e LNEC E 474 (2009), estas classificam os RCD, respetivamente, em duas classes, B ou C (tabela 2.15), ou em três, B, MB e C (tabela 2.16), também em função da sua composição. No caso da especificação LNEC E 473 (*op. cit.*), as classes são definidas em função da percentagem de constituintes dos RCD, a qual é avaliada de acordo com o procedimento preconizado na EN 933-11 (2009), e tendo em consideração as categorias estabelecidas na EN 13242:2002+A1 (2007). No caso da especificação LNEC E 474 (*op. cit.*), as classes são definidas com base nas proporções relativas de cada um dos constituintes dos RCD, as quais são determinadas de acordo com o método estabelecido na EN 933-11 (2009).

**Tabela 2.15** Classificação de RCD pela especificação LNEC E 473 (adaptado de LNEC E 473 (2009))

Classe	Proporção do constituinte					
	$R_c + R_u + R_g$ (%)	$R_g$ (%)	$R_b$ (%)	$R_a$ (%)	FL (cm <sup>3</sup> /kg)	X (%)
<b>B</b>	≥90	≤5	≤10	≤5	≤5	≤1
<b>C</b>	≥50	≤5	≤10	≤30	≤5	≤1

Legenda: ( $R_c$ ) betão, produtos de betão e argamassas; ( $R_u$ ) agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos; ( $R_g$ ) vidro; ( $R_b$ ) elementos de alvenaria de materiais argilosos (p. ex.: tijolos, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante; ( $R_a$ ) materiais betuminosos; (FL) material flutuante em volume; (X) outros: materiais coesivos (p. ex.: solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos), madeira não flutuante e estuque

**Tabela 2.16** Classificação de RCD pela especificação LNEC E 474 (adaptado de LNEC E 474 (2009))

Classe	Proporção do constituinte					
	$R_c + R_u + R_g$ (%)	$R_g$ (%)	$R_a$ (%)	$R_b + R_s$ (%)	FL (cm <sup>3</sup> /kg)	X (%)
<b>B</b>	≥90	≤10	≤5	≤10	≤5	≤1
<b>MB</b>	≤70	≤25	≤30	≤70	≤5	≤1
<b>C</b>	Sem limite	≤25	≤30	Sem limite	≤5	≤1

Legenda: ( $R_c$ ) betão, produtos de betão e argamassas; ( $R_u$ ) agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos; ( $R_g$ ) vidro; ( $R_s$ ) solos; ( $R_b$ ) elementos de alvenaria de materiais argilosos (p. ex.: tijolos, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante; ( $R_a$ ) materiais betuminosos; (FL) material pétreo flutuante; (X) outros: plásticos, borrachas, metais ferrosos e não ferrosos, madeira não flutuante e estuque

Na sua generalidade, os RCD são considerados como um tipo de resíduo inerte. Como refere Gonçalves (2007), a fração inerte representa, aproximadamente, 70% do volume total dos RCD, sendo os constituintes de maior destaque o betão e os materiais cerâmicos (UBA, 2008; Gonçalves, *op. cit.*; Algarvio, 2009; Zhao *et al.*, 2010), e em menor escala, os materiais betuminosos, rochosos e terrosos (Freire *et al.*, 2010).

Devido à complexidade das atividades de construção civil concomitantemente à utilização de diferentes tecnologias e materiais, são ainda frequentes na composição dos RCD outros constituintes, tais como a madeira, o plástico, o papel e o cartão (BT/PCC/436, 2006; Mália, 2010), todos pertencentes à classe dos resíduos orgânicos. A presença do cartão e do papel deriva das embalagens de equipamentos e de materiais esquecidos e/ou erradicamente misturados com os restantes resíduos (Gonçalves, *op. cit.*), encontrando-se grande parte do seu volume associado aos resíduos provenientes dos trabalhos de construção (Mália, *op. cit.*). A madeira, por seu turno, pode ser encontrada em qualquer tipo de obra (Gonçalves, *op. cit.*), sendo que nos resíduos de construção, assume particular importância quando há execução de cofragens (*ibid.*; Mália, *op. cit.*), ao passo que nos resíduos provenientes de edifícios antigos pode provir da respetiva estrutura (Gonçalves, *op. cit.*). Contudo, sendo um material normalmente tratado com produtos químicos, são necessários cuidados especiais durante a sua triagem, visto poder tratar-se de um resíduo perigoso (Mália, *op. cit.*).

A presença de diversos resíduos perigosos na composição dos RCD, como é o caso das tintas, dos produtos de tratamento de superfícies (Pestana, 2008), das telhas de fibrocimentos, dos óleos usados e dos equipamentos elétricos e eletrónicos (Costa *et al.*, 2005), implica a realização de uma triagem eficiente de forma a separar estes constituintes dos restantes constituintes dos RCD (UBA, *op. cit.*; Costa 2006 in Chaves, 2009; Northeast Waste Management Officials Association - NEWMOA, 2009), maximizando, deste modo, o potencial de recuperação da fração inerte daqueles resíduos (NEWMOA, *op. cit.*; Joint Research Center: Institute for Environment and Sustainability - JRC-IES,

2011). A contaminação da fração inerte dos RCD com resíduos perigosos inviabiliza a sua posterior reutilização, acabando a fração contaminada por ser considerada como um resíduo perigoso (*Fundación Labien*, 2004). Esta é, aliás, uma das principais razões para a pouca recetividade por parte das entidades competentes em valorizar os RCD em diversas áreas de aplicação (UBA, 2008).

São ainda classificados como resíduos perigosos as colas, os revestimentos, os selantes (Rodriguez *et al.*, 2007), assim como “(...) os aditivos para betão à base de solventes, os produtos químicos impermeabilizantes, as emulsões à base de alcatrão, as embalagens contaminadas com restos de materiais perigosos, as botijas de gás vazias, os equipamentos elétricos com componentes tóxicos (...)” e todos os resíduos “(...) que se tornam perigosos pela ação do meio onde permaneceram durante anos (contendo agentes poluentes)” (Mália, 2010).

A par dos resíduos perigosos, Pestana (2008) acrescenta ainda a possível presença de impurezas ou de contaminantes, como é o caso do amianto ou dos metais pesados, que podem contribuir para a contaminação dos RCD e diminuir significativamente a sua qualidade como agregado reciclado.

Na tabela 2.17 são apresentadas estimativas para vários estados-membros da UE no que respeita à composição dos RCD. Os dados apresentados por UBA (2008 *in* BIO *Intelligence Service*, 2011) não incluem as estimativas relativas aos resíduos resultantes de obras de escavação.

**Tabela 2.17** Estimativa da composição dos RCD produzidos em vários estados-membros da UE (adaptado de BIO *Intelligence Service*, 2011)

Composição		Alemanha	Bélgica (Flandres)	Dinamarca	Espanha	Finlândia	Países Baixos (a)
		2007	2000	2003	2005	2006	2001
<b>Betão</b>	(%)	70	41	25	12	33	40
<b>Materiais cerâmicos</b>			43	6	54		25
<b>Outros materiais minerais</b>		0	0	22	9	0	2
<b>Asfalto</b>		27	12	19	5	0	26
<b>Madeira</b>		0	2	0	4	41	2
<b>Metal</b>		0	0	0	3	14	1
<b>Gesso</b>		0	0	0	0	0	0
<b>Plásticos</b>		0	0	0	2	0	0
<b>Outros</b>		3	2	28	12	12	7

Legenda: (a) na fonte, o somatório é de 103%

A composição dos RCD, conforme demonstrado na tabela 2.17, varia de país para país (UBA, *op. cit.*; LNEC, 2010), sendo, deste modo, difícil definir a sua composição típica (NEWMOA, 2009). A heterogeneidade dos RCD deve-se a diversos condicionalismos como sejam: (1) o tipo de materiais predominantes e/ou disponíveis na região (LNEC, *op. cit.*); (2) o tipo de agregados naturais utilizados na construção civil (UBA, *op. cit.*; Ferreira, 2009; Mália, *op. cit.*); (3) o tipo, a localização, e os métodos utilizados durante a fase construtiva de uma obra (*Franklin Associates*, 1998; Gonçalves, 2007; Deng *et al.*, 2008; Fortunato *et al.*, 2009; Mália, *op. cit.*); (4) o processo de demolição, de triagem e de processamento dos RCD (Ferreira, *op. cit.*; Freire *et al.*, 2010); (5) o nível de desenvolvimento da indústria da construção civil local, nomeadamente em termos de qualidade e experiencia da mão-de-obra disponível e técnicas de construção e demolição utilizadas (LNEC, *op. cit.*); (6) o desenvolvimento de obras especiais na região (saneamento e restauração de centros

históricos); (7) o desenvolvimento económico da região (Angulo *et al.*, 2002); e (8) a execução de novas construções (LNEC, 2010).

#### 2.4.1.3.3 - Com base no destino final

Com base no destino final e de acordo com Pereira (2002 *in* Gonçalves, 2007), os RCD podem ser classificados em quatro classes: (1) resíduos reutilizáveis ou recicláveis, p. ex.: o betão e os materiais cerâmicos, como agregados reciclados em obras de engenharia civil; (2) resíduos recicláveis, nos quais se enquadram o plástico, o papel/cartão, os metais, o vidro e a madeira, entre outros, em aplicações distintas das referidas no ponto anterior; (3) resíduos para os quais não foram ainda desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem e/ou recuperação e que, deste modo, terão de ser encaminhados para aterro; e (4) resíduos perigosos, oriundos de operações de demolição, reabilitação e restauros, p. ex.: o amianto, os CloroFluoro Carbonetos - CFC, e os PCB, que deverão ser entregues a operadores licenciados.

*Symonds Group* (1999), por seu lado, refere que os RCD podem ser: (1) reutilizados em aplicações internas ou externas à obra que os originou; (2) reciclados nas centrais de reciclagem, em aplicações externas a essas centrais, e em aplicações internas ou externas à obra que os originou sem terem, contudo, sido previamente processados; (3) incinerados com ou sem aproveitamento energético; e (4) depositados em aterros de resíduos ou em lixeiras.

Na tabela 2.18 apresentam-se, para 15 estados-membros da UE, dados relativos à quantidade de RCD produzidos e respetivas percentagens de envio para os vários destinos considerados por *Symonds Group* (*ibid.*).

**Tabela 2.18** Quantidades e destino final dos RCD em vários estados-membros da UE (adaptado de Barandas, 2009)

País	Quantidade de RCD (10 <sup>6</sup> t)	Destino Final			
		Reutilização	Reciclagem	Incineração	Aterro de resíduos
		(%)			
<i>Alemanha</i>	59	0	17	0	83
<i>Áustria</i>	4,7	0	41	0	59
<i>Bélgica</i>	6,75	1	87	1,0	11
<i>Dinamarca</i>	2,64	6	75	3,0	16
<i>Espanha</i>	12,8	<5			>95
<i>Finlândia</i>	1,35	3	42	24,0	31
<i>França</i>	23,6	0	15	0	85
<i>Grécia</i>	1,8	<5			>95
<i>Irlanda</i>	0,57	1	0	0	99
<i>Itália</i>	20	6	3	0	91
<i>Luxemburgo</i>	0,3	<5			>95
<i>Países Baixos</i>	11,17	0	90	1	9
<i>Portugal</i>	3,2	<5			>95
<i>Reino unido</i>	30	0	17	0	83
<i>Suécia</i>	1,69	1	20	17	62

Na tabela 2.19 apresentam-se, para Portugal, dados relativos ao destino dos RCD produzidos. De acordo com Pereira *et al.* (2004), esta informação resulta de relatórios realizados em Portugal e

em outros estados-membros UE, mas também de estimativas disponibilizadas por parte de entidades nacionais competentes na gestão de resíduos.

**Tabela 2.19** Destino final dos RCD, em percentagem de massa, em Portugal (adaptado de Pereira *et al.*, 2004)

Composição		Reutilização	Reciclagem	Incineração	Aterro
<i>Betão, tijolos, azulejos e alvenarias</i>		15	0	0	85
<i>Madeira</i>		10	30	30	30
<i>Papel e cartão</i>		0	20	30	50
<i>Vidro</i>		0	0	0	100
<i>Plásticos</i>		0	10	5	85
<i>Metais (aço incluído)</i>	(%)	10	60	0	30
<i>Isolamentos</i>		0	0	0	100
<i>Outros resíduos</i>		0	10	5	85
<i>Solos, pedras, entre outros</i>		40	0	0	60
<i>Materiais betuminosos</i>		10	0	0	90

#### 2.4.1.4 - Produção dos RCD

##### 2.4.1.4.1 - A nível nacional

Em Portugal são escassos os dados relativos ao volume de RCD produzidos, assim como ao impacte ambiental e aos custos decorrentes da sua produção (Pinto, 1999 *in* De Melo *et al.*, 2011). Ainda assim, na bibliográfica consultada foram identificados alguns estudos que visaram a quantificação dos RCD produzidos em território nacional (tabela 2.20), com os resultados obtidos, contudo, a não apresentarem a uniformidade desejada, sendo por isso insuficientes para a correta caracterização da situação dos RCD em Portugal (Mália, 2010).

Outros estudos como os realizados por Barandas (2009) e De Melo *et al.* (*op. cit.*) merecem igual destaque pela sua atualidade, ainda que ambos sejam referentes a regiões específicas do território nacional.

Barandas (*op. cit.*), visando estudar a eficácia das operações do sistema de gestão de RCD na região de Trás-os-Montes e Alto Douro procedeu à quantificação do volume de RCD produzidos entre 2006 e 2007. Para tal, teve como referência os estudos realizados por Aguiar (2004), Jalali (2004), Pereira *et al.* (2004) e Sepúlveda (2007) e utilizou como variáveis de cálculo a área da “superfície de construção licenciada” (m<sup>2</sup>) e o “índice de resíduos” (kg/m<sup>2</sup>). Para os anos de 2006 e 2007 obteve, respetivamente, valores próximos de 217x10<sup>3</sup> ton e 215x10<sup>3</sup> ton, nos quais se incluíram os resíduos resultantes de novas construções e de operações de alteração/ampliação, reconstrução e demolição de estruturas.



**Tabela 2.20** Quadro resumo de alguns estudos realizados para a quantificação dos RCD produzidos em Portugal (adaptado de Mália, 2010(\*); e De Melo *et al.*, 2011(\*\*))

Autor	Observação	Valor estimado
<b>Symonds Group (1999 in (*) e in (**))</b>	Estudo realizado a nível europeu referente a 1997. O valor calculado resultou de "(...) uma estimativa realizada para Espanha, correspondendo à média entre 275 kg/hab e 375 kg/hab, que o governo da Catalunha assumiu como sendo os valores referentes à produção de RCD nessa região, para zonas urbanas e rurais, respetivamente". O valor calculado não incluiu a fração referente aos solos resultantes de obras de escavação e aos resíduos resultantes de operações de demolição ou reabilitação de estradas.	3,20x10 <sup>6</sup> ton/ano (estimando 325 kg/hab)
<b>Carvalho (2001 in (*)</b>	Trabalho de investigação realizado com base em dados obtidos pelo INE, junto das empresas do sector da construção civil, referentes a 1997.	7,69x10 <sup>6</sup> ton/ano
	Trabalho de investigação realizado com base em dados fornecidos pelo INR referentes a 1998. O valor foi determinado com recurso a métodos de seleção de amostra regional, com inquérito e entrevista direta.	63,16x10 <sup>3</sup> ton/ano
<b>Com base num Workshop intitulado "Sistemas Integrados de Gestão de Fluxos Específicos de Resíduos" in (*)</b>	Estudo realizado em 2002 para a zona litoral norte de Portugal. O valor estimado incluiu a fração referente aos solos de escavação e aos resíduos resultantes de operações de demolição ou reabilitação de estradas.	2,13x10 <sup>6</sup> ton/ano (estimando 325 kg/hab)
	Estudo realizado em 2002 para todo o território nacional.	6,44x10 <sup>6</sup> ton/ano (estimando 325 kg/hab)
<b>Ruivo e Veiga (2004 in (*) e in (**))</b>	Estimativa realizada para 2002 tendo por base os índices de produção de RCD por área construída/demolidas obtidos a partir de estudos efetuados em Espanha e através de dados disponibilizados pela Câmara Municipal do Barreiro.	4,40x10 <sup>6</sup> ton/ano (estimando 423 kg/hab)
	Estimativa realizada para 2002 tendo por base inquéritos realizados a todos os sistemas de gestão de RSU de Portugal. O fraco resultado explica-se pela insuficiente informação disponibilizada por parte das empresas produtoras de RCD e pela pouca participação das empresas com maior importância e poder no ramo.	181,22x10 <sup>3</sup> ton/ano
<b>Coelho e Brito (2008 in (**))</b>	Estimativa realizada para 2007, tendo por base uma metodologia de amostragem que dividiu os projetos em: tipo - reabilitação, demolição, e novas construções; funcionalidade - edifícios de habitação, de serviços e obras públicas; e idade. O valor estimado não incluiu a fração referente aos solos resultantes de obras de escavação e aos resíduos resultantes de operações de demolição ou reabilitação de estradas.	(estimando 199,5 kg/hab)

Legenda: Instituto Nacional de Estatística - INE

De Melo *et al.* (2011), por seu turno, estimaram a produção de RCD na Área Metropolitana de Lisboa - AML, entre 2006 e 2007. Como base para o estudo realizado utilizaram os parâmetros propostos por Pinto (1999): (a) a atividade de construção como indicador de novas construções, tendo em conta a área da "superfície de novas construções" (m<sup>2</sup>) e o "indicador de produção de resíduos" (kg/m<sup>2</sup>); (b) o fluxo de resíduos como indicador de operações de remodelação de estruturas e (c) a deposição de resíduos em lixeiras como indicador da deposição ilegal de resíduos. Os resultados apresentam-se na tabela 2.21 e têm em conta os resíduos resultantes de operações de construção e remodelação de estruturas e de tratamento de solos. Excluíram-se destes, os resíduos resultantes de escavações e de operações em infraestruturas rodoviárias.

**Tabela 2.21** Quadro comparativo entre a produção de RCD observada em alguns municípios do Brasil e de Portugal (adaptado de De Melo *et al.*, 2011)

País	Município	pop. (x10 <sup>3</sup> )	RCD				RCD <i>per capita</i>	
			Novas Construções ton/dia	Remodelação de estruturas ton/dia	Deposição ilegal ton/dia	Total ton/dia	ton/hab	ano
Brasil	<b>São José dos Campos</b>	539	201	184	348	733	0,47 (i)	1995
	<b>Ribeirão Preto</b>	505	577	356	110	1043	0,71 (i)	1995
	<b>Santo André</b>	649	477	536	-	1013	0,51 (i)	1997
	<b>Uberlândia</b>	501	359	359	241	958	0,68 (i)	2000
	<b>Guarulhos</b>	1073	576	732	-	1308	0,38 (i)	2001
	<b>Recife</b>	1487 (h)	430	263	680	1372	0,29	2004
Portugal	<b>AML (a)</b>	2808 (b)	1427 (c)	2176 (d)	15,1 (e)	3619 (f)	0,40 (g)	2007
	<b>Grande Lisboa</b>	2026 (b)	923 (c)	1733 (d)	5,9 (e)	2661 (f)	0,41 (g)	2007
	<b>Município de Lisboa</b>	500 (b)	9 (c)	945 (d)	-	954 (f)	0,60 (g)	2007
	<b>Península de Setúbal</b>	783 (b)	505 (c)	444 (d)	9,2 (e)	958 (f)	0,38 (g)	2007

Legenda: população - pop.; (a) 18 municípios divididos pela Grande Lisboa e Península de Setúbal; (b) população residente em 2007 de acordo com o INE, com o registo a datar de 2008; (c) indicador parcial de produção de RCD (ton/dia) para novas construções de acordo com o sistema de recolha de resíduos dos municípios da AML; (d) indicador parcial da produção de RCD (ton/dia) para obras de remodelação e demolição; (e) indicador parcial do fluxo de RCD recolhido em lixeiras dos municípios da AML; (f) somatório dos valores referentes aos pontos (c), (d) e (e); (g) taxa de produção de RCD *per capita* em resultado da estimativa realizada ((g)=(f)/(b)); (h) IBGE (2004 *in* De Melo *et al.*, 2011); (i) Pinto e Gonzalez (2005 *in* De Melo *et al.*, 2011)

Os estudos realizados em Portugal até à data com vista à quantificação dos RCD produzidos basearam-se essencialmente em inquéritos efetuados às empresas responsáveis pela produção e gestão de RCD, e em valores *per capita*, pelo que os valores calculados traduzem com pouca exatidão a atual situação no território nacional em matéria de produção de resíduos, em geral, e de RCD, em particular (Mália, 2010). A falta de dados fiáveis quanto ao volume de RCD produzidos condizentes com estimativas de baixo grau de certeza têm assim dificultado a definição de uma estratégia adequada para a gestão de RCD visando a redução da sua produção (Algarvio, 2009). Como exemplo prático do exposto, refira-se De Melo *et al.* (2011) que para o município de Lisboa, conclui que este não se encontra preparado para a gestão de um volume significativo de RCD resultante das mais diversas operações de remodelação.

#### 2.4.1.4.2 - A nível internacional

Os RCD são dos resíduos mais produzidos na Europa (*Fédération Interationale du Recyclage - FIR*, 2003; LNEC, 2008; UBA, 2008), tendo a sua produção crescido significativamente nos últimos anos, conforme mostram os dados apresentados na tabela 2.22, quer pelas ações de “(...) restauro urbano devido às necessidades de um melhor aproveitamento do solo em zonas de elevada densidade populacional (...)”, quer pelas sucessivas construções (Barandas, 2009).

**Tabela 2.22** Estimativas da quantidade de RCD produzidos na Europa (adaptado de BIO *Intelligence Service*, 2011)

Autor	Ano	Total de RCD (x10 <sup>6</sup> ton)	Per capita (ton/hab)
<b>WBCSD (2009)</b>	2002	510	1,1
<b>ETC/RWM (2009)</b>	2004	866	1,8
<b>Eurostat (2010)</b>	2006	970	2,0

Legenda: *World Business Council for Sustainable Development* - WBCSD; *European Topic Centre on Resource and Waste Management* - ETC/RWM

Todavia, à semelhança do verificado em Portugal, os resultados das estimativas realizadas não apresentam a uniformidade desejada (BIO *Intelligence Service*, 2011), quer comparando os resultados relativos a um determinado estado-membro da UE, quer comparando os calculados para os 27 estados-membros. Este facto justifica-se pela adoção de diferentes mecanismos por parte dos vários estados com vista ao controlo da produção de RCD (Ruivo e Veiga, 2004; BIO *Intelligence Service*, *op. cit.*), pela não uniformização da definição do termo RCD (Franklin Associates, 1998; BIO *Intelligence Service*, *op. cit.*), ou pelo recurso a diferentes meios de comunicação para o reporte dos volumes de RCD produzidos (EEA, 2001 *in* Fatta *et al.*, 2003; BIO *Intelligence Service*, *op. cit.*). Outros fatores podem, ainda, contribuir para a incoerência de resultados, como sejam:

- i. fatores económicos: a produção de RCD depende da atividade de construção e do grau de desenvolvimento económico do país (Franklin Associates, *op. cit.*; Angulo *et al.*, 2002; Fatta *et al.*, *op. cit.*; Dos Santos, 2007; Dolan *et al.*, 1999 *in* Zhao *et al.*, 2010; BIO *Intelligence Service*, *op. cit.*);
- ii. fatores associados à atividade de construção: o tipo de material utilizado varia de região para região dentro do próprio país, sendo que nos países nórdicos, p. ex.: a Finlândia ou a Suécia, a madeira é o principal material utilizado na construção (Angulo *et al.*, *op. cit.*; BIO *Intelligence Service*, *op. cit.*);
- iii. fatores culturais: a opção pela demolição pode não ser considerada uma medida positiva por todos países (Fatta *et al.*, *op. cit.*; BIO *Intelligence Service*, *op. cit.*);
- iv. fatores técnicos: a qualidade dos materiais utilizados na construção influencia a taxa de demolição, ou seja, é expectável uma maior taxa de demolição em municípios onde as construções utilizem betão de fraca qualidade (BIO *Intelligence Service*, *op. cit.*); e
- v. fatores políticos nos quais se inclui as regulamentações nacionais e municipais no que respeita às operações de triagem, de reutilização e de reciclagem (Franklin Associates, *op. cit.*; Dolan *et al.*, 1999 *in* Zhao *et al.*, *op. cit.*).

A fim de minimizar as discrepâncias existentes entre algumas das estimativas já publicadas, a BIO *Intelligence Service* (*op. cit.*) procedeu à realização de uma nova estimativa com vista à quantificação dos RCD produzidos nos 27 estados-membros da UE. Para o efeito, excluiu os resíduos resultantes de operações de escavação e atribuiu novos valores para os estados-membros que apresentassem valores de produção de RCD reduzidos, facto que reflete a falta de controlo por parte das respetivas entidades estatais competentes em matéria de gestão dos referidos resíduos. Na tabela 2.23 apresentam-se os resultados finais para 2004 e 2005.

**Tabela 2.23** Estimativa da quantidade de RCD produzidos nos 27 estados-membros da UE para 2004 e 2005 (adaptado de BIO *Intelligence Service*, 2011)

Pais	Produção per capita (a) (ton/hab)	Produção per capita (b) (ton/hab)	Produção per capita (ton/hab)	pop. (2004) (x10 <sup>6</sup> )	Total de RCD (2004) (x10 <sup>6</sup> ton)	pop. (2005) (x10 <sup>6</sup> )	Total de RCD (2005) (x10 <sup>6</sup> ton)
<i>Alemanha</i>	2,33 (c)	-	0,88	82,5	72,4	82,4	72,3
<i>Áustria</i>	-	-	0,81	8,2	6,6	8,3	6,7
<i>Bélgica</i>	-	-	1,06	10,4	11,1	10,5	11,1
<i>Bulgária</i>	-	0,39 (c)	0,94	7,8	7,3	7,7	7,3
<i>Chipre</i>	-	0,58 (c)	0,94	0,7	0,7	0,8	0,7
<i>Dinamarca</i>	3,99 (c)	-	0,83 (d)	5,4	4,5	5,4	4,5
<i>Eslováquia</i>	-	0,26 (c)	0,94	5,4	5,1	5,4	5,1
<i>Eslovénia</i>	-	0,00 (c)	0,94	2,0	1,9	2,0	1,9
<i>Espanha</i>	-	-	0,74	42,3	31,3	43,0	31,8
<i>Estónia</i>	-	-	1,12	1,3	1,5	1,3	1,5
<i>Finlândia</i>	3,99 (c)	-	1,00 (e)	5,2	5,2	5,3	5,2
<i>França</i>	5,50 (c)	-	0,99 (f)	62,8	62,1	63,2	62,6
<i>Grécia</i>	-	0,37 (c)	0,94	11,1	10,4	11,1	10,5
<i>Hungria</i>	-	0,43 (c)	0,94	10,1	9,5	10,1	9,5
<i>Irlanda</i>	2,74 (c)	-	0,63 (g)	4,0	2,5	4,1	2,6
<i>Itália</i>	-	-	0,80	58,5	46,8	58,8	47,0
<i>Letónia</i>	-	0,04 (c)	0,94	2,3	2,2	2,3	2,2
<i>Lituânia</i>	-	0,10 (c)	0,94	3,4	3,2	3,4	3,2
<i>Luxemburgo</i>	5,90 (c)	-	1,42 (h)	0,5	0,7	0,5	0,7
<i>Malta</i>	-	-	1,95	0,4	0,8	0,4	0,8
<i>P. Baixos</i>	-	-	1,47	16,3	24,0	16,3	24,0
<i>Polónia</i>	-	0,11 (c)	0,94	38,2	38,2	38,2	38,2
<i>Portugal</i>	-	-	1,09	10,5	11,5	10,6	11,5
<i>Reino Unido</i>	-	-	0,91	60,1	54,8	60,4	55,2
<i>Rep. Checa</i>	-	-	1,44	10,2	14,7	10,3	14,8
<i>Roménia</i>	-	0,00 (c)	0,94	21,7	20,4	21,6	20,3
<i>Suécia</i>	-	-	1,14	9,0	10,3	9,0	10,3
<b>Total</b>	-	-	1,09	490,4	459,6	492,4	461,4

Legenda: (a) incluiu os materiais resultantes de operações de escavação; (b) valores abaixo do valor mínimo estimado pela BIO *Intelligence Service*, 2011; (c) ETC/RWM (2009 in BIO *Intelligence Service*, 2011); (d) *Danish Environmental Protection Agency* - DEPA (2004 in BIO *Intelligence Service*, 2011); (e) assumindo 75% de material resultante de operações de escavação; (f) ADEME&FNTP e ADEME&FFB ([sd] in BIO *Intelligence Service*, 2011); (g) assumindo 77% de material resultante de operações de escavação, sendo a fonte Irish Environmental Protection Agency ([sd] in BIO *Intelligence Service*, 2011); (i) ENECO, S.A. (2002 in BIO *Intelligence Service*, 2011)

De acordo com os valores mínimos e máximos de produção *per capita*, 0,63 e 1,95, e em conjunto com os valores totais da população para os anos de 2004 e 2005, a produção anual de RCD por parte dos 27 estados-membros variou entre 308,9x10<sup>6</sup> ton e 956,3x10<sup>6</sup> ton, e entre 310,2x10<sup>6</sup> ton e 960,2x10<sup>6</sup> ton, respetivamente. Caso se incluíam os materiais resultantes de operações de escavação, os valores são consideravelmente superiores, tendo estes variado, aproximadamente, entre 1,1x10<sup>9</sup> ton e 2,9x10<sup>9</sup> ton em 2004 e 2005.

#### 2.4.1.5 - Caracterização dos RCD-R

##### 2.4.1.5.1 - Avaliação da perigosidade ambiental

Conforme previsto no regulamento (UE) nº 305/2011, a valorização dos agregados reciclados resultantes do processamento de resíduos, nos quais se incluem o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, em obras de engenharia civil só é viabilizada por parte das entidades reguladoras quando as características ambientais daqueles agregados não evidenciam risco para o meio ambiente e para a saúde pública,

ou seja, sempre que se comprove que se tratam de materiais inertes. Deste modo, a par da caracterização geotécnica necessária para a avaliação da adequabilidade do agregado reciclado como material a utilizar em obras de engenharia civil, é igualmente imprescindível proceder-se à avaliação do seu comportamento ambiental a fim de evidenciar o seu potencial poluente para o meio ambiente (Roque *et al.*, 2010).

A avaliação do potencial poluente dos agregados reciclados pode ser realizada mediante diversos métodos, sendo “(...) os ensaios de lixiviação os mais utilizados” (Ferreira, 2010). Na Europa, estes ensaios decorrem segundo a norma EN 12457-2 (2002), onde a relação L/S é de 10 l/kg e a granulometria da amostra é igual ou inferior a 4 mm, ou segundo a norma EN 12457-4 (2002), onde a relação L/S é também de 10 l/kg, mas a granulometria da amostra deve ser igual ou inferior a 10 mm (Esteves *et al.*, 2008; Ferreira, *op. cit.*).

Em Portugal, a classificação dos agregados reciclados como material inerte é conseguida se a sua lixiviabilidade for inferior aos valores-limite definidos no DL n.º 183/2009 para admissão de resíduos em aterros para resíduos inertes (Roque *et al.*, *op. cit.*). No caso particular dos RCD, apesar de estes poderem conter constituintes poluentes, o que implica proceder-se à avaliação do seu potencial poluente quando se pretende a sua valorização em obra, de acordo com o DL n.º 183/2009, tal avaliação poderá ser dispensada, caso se cumpram os requisitos previstos na Parte B do Anexo IV do referido DL. O AB<sub>RCD</sub> resultante do processamento de betão limpo está dispensado da avaliação do seu potencial poluente.

Na tabela 2.24 apresentam-se os resultados de ensaios de lixiviação realizados por Esteves *et al.* (*op. cit.*), LNEC (2008) e Ferreira (2009) com amostras de AB<sub>RCD</sub>. Estes autores, ao compararem os resultados obtidos com os valores-limite dos parâmetros definidos na diretiva 2003/33/CE, concluíram que as amostras de AB<sub>RCD</sub> ensaiadas enquadravam-se na categoria dos resíduos admissíveis em aterros de resíduos inertes.

**Tabela 2.24** Valores da lixiviabilidade de amostras de AB<sub>RCD</sub>

Parâmetro		Esteves <i>et al.</i> (2008) (a)			LNEC (2008)	Ferreira (2009)
		Rb1	Rb2	Rb3	(b)	(c)
<b>Cádmio, Cd</b>	(mg/kg)	$\leq 0,62 \times 10^{-3}$	$\leq 0,62 \times 10^{-3}$	$\leq 0,62 \times 10^{-3}$	$< 0,28 \times 10^{-3}$	$< 0,45 \times 10^{-3}$
<b>Crómio total, Cr</b>		$15,0 \times 10^{-3}$	$27,0 \times 10^{-3}$	$9,1 \times 10^{-3}$	$8,9 \times 10^{-3}$	$87 \times 10^{-3}$
<b>Cobre, Cu</b>		$1,5 \times 10^{-3}$	$14 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$87,9 \times 10^{-3}$	$27 \times 10^{-3}$
<b>Níquel, Ni</b>		$\leq 2,2 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-3}$	$41,6 \times 10^{-3}$	$30 \times 10^{-3}$
<b>Chumbo, Pb</b>		$\leq 0,4 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$< 7,7 \times 10^{-3}$	$28 \times 10^{-3}$
<b>Zinco, Zn</b>		$1,6 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$45,5 \times 10^{-4}$	$23 \times 10^{-3}$
<b>Cloro, Cl</b>		11,0	35,9	13,5	36	128
<b>Sulfato, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		10,0	35,2	8,02	488 (d)	77
<b>COD</b>		3,8	7,6	138,0	320	-

Legenda: (a) lixiviado de resíduos de betão de granulometria  $\leq 10$  mm, tendo o ensaio de lixiviação sido realizado segundo a norma EN 12457-4 (2002); (b) lixiviado de material proveniente da britagem de resíduos resultantes da demolição de betão limpo, tendo o ensaio de lixiviação sido realizado segundo a norma EN 12457-4 (2002); (c) lixiviado de material proveniente unicamente de betão, tendo o ensaio de lixiviação sido realizado segundo a norma EN 12457-4 (2002); (d) valores apresentados em mg/l

Estudos idênticos foram realizados por Freire *et al.* (2011), Galvín *et al.* (2011) e Barbudo *et al.* (2012), ainda que as amostras ensaiadas fossem compostas, na sua generalidade, por uma mistura de materiais cerâmicos, betuminosos e betão britado. Os resultados obtidos pelos dois primeiros autores permitiram idêntica conclusão, em termos de classificação da amostra ensaiada, à obtida

com base nos resultados apresentados na tabela 2.24, dado as amostras enquadrarem-se também na categoria de resíduos inertes.

Barbudo *et al.* (2012), por seu turno, a par de ensaios de lixiviação realizados segundo a norma EN 12457-3 (2002), procederam ainda à realização de ensaios de solubilidade de acordo com o procedimento preconizado na *Una Norma Española* - UNE 103201 (1996) e EN 1744-1 (1999) no sentido de avaliar a solubilidade dos  $\text{SO}_4^{2-}$  em duas soluções aquosas, água e ácido clorídrico, respetivamente. Comparando os resultados obtidos nos três ensaios com os valores-limite em termos de concentração de elementos químicos lixiviados estabelecidos na Diretiva 99/31/CE, os autores concluíram que, dos materiais ensaiados, apenas os agregados naturais e os agregados reciclados resultantes do processamento de betão, em que percentagem total de materiais cerâmicos e betuminosos, e gipsite, entre outros, era inferior a 3,1%, se enquadravam nos resíduos inertes.

#### **2.4.1.5.2 - Caracterização química e mineralógica**

##### *a) Composição química*

Na bibliografia consultada foram identificados dois estudos realizados com vista à análise da composição química de amostras de  $\text{AB}_{\text{RCD}}$ .

Angulo (2005) procedeu no seu estudo à amostragem de vários elementos constituintes dos RCD, os quais foram previamente britados por impacto nas respetivas centrais de reciclagem. Uma das amostras, designada GS, era composta por betão resultante de operações de demolição, contudo, o autor não quantificou a sua percentagem. A composição granulométrica das amostras foi determinada segundo a Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 7217 tendo sido utilizado um conjunto de peneiros com as seguintes aberturas de malha, em mm: 25,4; 19,1; 12,7; 9,5; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15. As frações granulométricas de dimensões inferiores a 25,4 mm foram denominadas por A, enquanto que as frações de dimensão superior a 25,4 mm foram reprocessados em laboratório com britador de mandíbula, tendo assumido a designação B. As análises químicas foram realizadas sobre diferentes frações granulométricas mediante a técnica de espectrometria de Fluorescência de Raios X - FRX.

Limbachiya *et al.* (2006), por seu turno, prepararam três provetes de  $\text{AB}_{\text{RCD}}$  com a dimensão das partículas a variar entre 4 mm e 16 mm e cuja percentagem de betão se situava entre 85,5% e 92,4%. As amostras, recolhidas em três locais de obra distintos localizados na cidade de Londres (Reino Unido), foram previamente processadas e encontravam-se isentas de elementos contaminantes. O método de análise utilizado foi também a técnica de FRX.

Os resultados obtidos pelos dois autores mencionados encontram-se resumidos na tabela 2.25. No caso particular dos resultados obtidos por Angulo (*op. cit.*), apresentam-se apenas os referentes às frações granulométricas seguintes: 9,5 mm - 4,8 mm, fração grossa; 0,6 mm - 0,3 mm, fração média; e <0,15 mm, fração fina.

**Tabela 2.25** Composição química de amostras de AB<sub>RCD</sub>

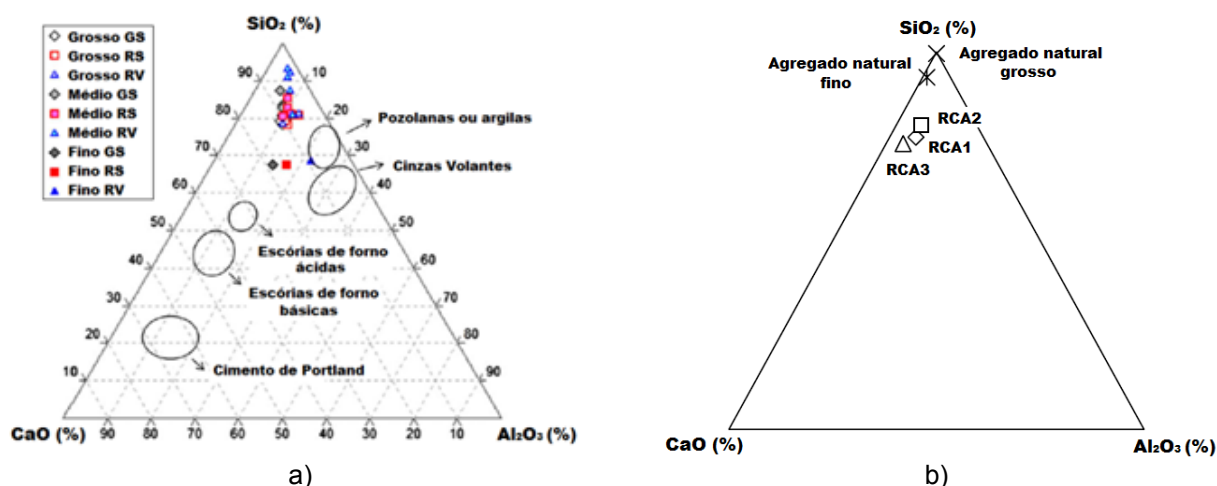
Composição		Limbachiya et al. (2006)				Angulo (2005)					
		PC	4 - 16 mm			9,5 - 4,8 mm		0,6 - 0,3 mm		<0,15 mm	
			RCA 1	RCA 2	RCA 3	A	B	A	B	A	B
Betão	(%)	N.A.	92,4	92,1	85,5	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)
Alvenaria			1,9	1,6	5,3						
Asfalto			4,9	1,4	3,3						
Finos			0,2	3,4	4,4						
Material com $\rho<1\times10^3\text{ Mg/m}^3$			-	0,6	0,5						
Outros (a)			0,5	0,9	1,0						
Composto químico		PC	RCA 1	RCA 2	RCA 3	A	B	A	B	A	B
SiO <sub>2</sub>	(%)	20,6	65,4	68,4	63,6	66,0	66,6	75,6	76,6	47,8	49,8
TiO <sub>2</sub>		0,2	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4	0,3	0,2	0,7	0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5,5	2,2	5,5	3,6	2,7	2,7	2,0	2,0	3,6	3,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3,3	5,3	2,4	2,0	9,5	7,6	5,8	4,5	11,1	8,4
MnO		0,06	0,05	0,05	0,06	-	-	-	-	-	-
MgO		2,3	1,9	2,8	2,6	1,3	1,3	0,7	0,7	1,8	2,0
CaO		62,5	13,9	11,2	16,9	8,6	9,5	5,9	6,8	13,5	17,5
Na <sub>2</sub> O		0,7	1,2	0,9	1,0	1,4	0,9	0,4	0,3	0,5	0,6
K <sub>2</sub> O		1,7	0,6	0,6	0,5	2,6	2,4	1,6	1,5	1,8	1,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,2	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,2
PF	1,64	9,12	7,56	9,19	8,2	8,4	7,9	6,7	20,0	16,1	

Legenda: Nada a Assinalar - N.A.; Perda ao Fogo - PF; Agregado Reciclado de Betão (*cf. Recycled Concrete Aggregate* - RCA); Cimento de Portland (*cf. Portland Cement* - PC); (a) vidro, madeira e plástico, entre outros; (b) é composta por betão resultante de operações de demolição, contudo, o autor não quantifica a sua constituição em termos percentuais

Dos resultados obtidos, Angulo (2005) e Limbachiya *et al.* (2006) concluíram que o material ensaiado é composto, essencialmente, por dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) ou sílica, entre 47,8% e 76,6%, óxido de cálcio (CaO) ou cal, entre 5,9% e 17,5%, e trióxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou alumina, entre 2% e 11,1%. Os silicatos presentes no cimento e nos agregados naturais utilizados na produção de cimento e de betão foram considerados como os principais responsáveis pelos elevados valores de SiO<sub>2</sub>.

Na figura 2.12a mostra-se um diagrama apresentado em Angulo *et al.* (2009), que compara a concentração em SiO<sub>2</sub>, CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nos provetes analisados e nos materiais utilizados na produção de cimento. A amostra RS é composta essencialmente por tijolos e argamassas, resíduos mistos de demolições industriais e de obras de infraestruturas urbanas, podendo conter também betão e solo, enquanto que a amostra RV é constituída por tijolos e argamassas.

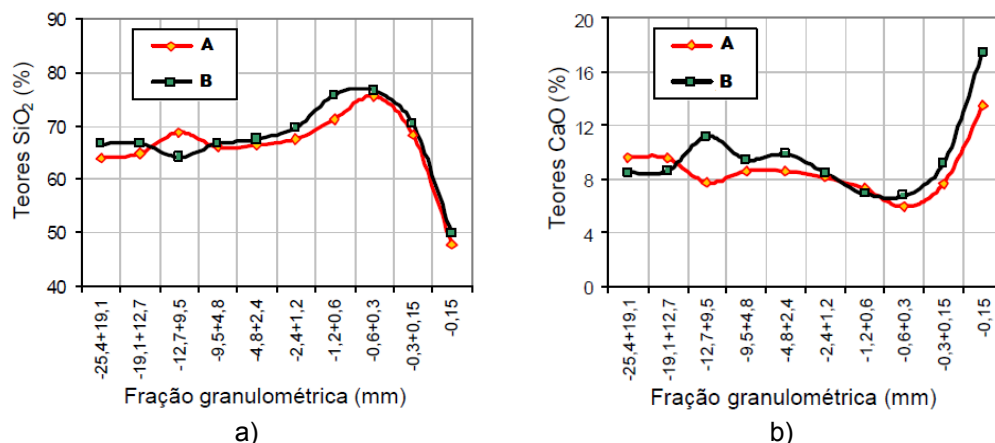
Na figura 2.12b apresenta-se um diagrama onde se comparam os valores de concentração em SiO<sub>2</sub>, CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nos materiais RCA1, RCA2 e RCA3 com os existentes nos agregados naturais grossos e finos. A natureza destes últimos não foi especificada por Limbachiya *et al.* (*op. cit.*).



Legenda: GS - fração grossa: 9,5 mm - 4,8 mm, fração média: 0,6 mm - 0,3 mm, fração fina: <0,15 mm; RS - fração grossa: 25,4 mm - 19,1 mm, fração média: 1,2 mm - 0,6 mm, fração fina: <0,15 mm; RV - fração grossa: 19,1 mm - 12,7 mm, fração média: 2,4 mm - 1,2 mm, fração fina: <0,15 mm

**Figura 2.12** Comparação entre as concentrações de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nos provetes analisados por: a) Angulo *et al.* (2009); e b) Limbachiya *et al.* (2006), com as existentes em outros materiais

A par do exposto, salienta-se ainda que Angulo (2005) refere que a composição química das amostras GS, se encontra diretamente relacionada com a sua granulometria, visto os teores de  $\text{SiO}_2$  e de  $\text{CaO}$  serem, respetivamente, direta (figura 2.13a) e inversamente (figura 2.13b) proporcionais ao decréscimo do diâmetro das partículas do material. Igual influência não foi verificada em relação às etapas de britagem (figura 2.13a e figura 2.13b), dado que os teores de  $\text{SiO}_2$  e de  $\text{CaO}$  terem sido idênticos nas curvas A e B.



Legenda: A - amostra de GS que após a primeira britagem por impacto apresentava dimensões inferiores a 25,4 mm; B - amostra de GS que após a primeira britagem por impacto apresentava dimensões superiores a 25,4 mm, tendo sido, por isso, reprocessada, em laboratório, em britador de mandíbula

**Figura 2.13** Resultados obtidos da análise química realizada por Angulo (2005) sobre várias frações granulométricas do GS

### b) Composição mineralógica

A fração inerte dos RCD-R é composta, maioritariamente, por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), feldspato  $[(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8]$ , moscovite ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ), ilite ( $\text{K}_{1-1,5}\text{Al}_4[\text{Si}_{7-6,5}\text{Al}_{1-1,5}\text{O}_{20}](\text{OH})_4$ ) e caulinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), e, em menores quantidades, por outros



elementos, como sejam: os hidróxidos de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ); os trióxidos de alumínio ( $\text{Al(OH)}_3$ ); e os silicatos hidratados (Bianchini *et al.*, 2005). A presença de quartzo, de calcite e de feldspato deve-se essencialmente aos materiais utilizados na produção de cimento, nomeadamente o calcário, a argila ou outros materiais que contenham  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}$  (Dhir *et al.*, 1999 *in* Limbachiya *et al.*, 2006; Vegas *et al.*, 2008; Angulo *et al.*, 2009), ao passo que minerais como a moscovite, a ilite e a caulinite resultam dos materiais cerâmicos presentes na constituição dos RCD-R (Vegas *et al.*, *op. cit.*; Angulo *et al.*, *op. cit.*).

No caso particular do  $\text{AB}_{\text{RCD}}$ , Limbachiya *et al.* (*op. cit.*), ao procederem à análise mineralógica por Difração de Raios X - DRX, dos provetes RCA1, RCA2 e RCA3 (composição química encontra-se detalhada na tabela 2.25), assinalaram a presença de quartzo, e em menores quantidades, de calcite e de feldspato. Foram ainda identificados no provete RCA3, minerais como a moscovite e a ilite, em resultado da presença de material cerâmico.

Vegas *et al.* (*op. cit.*) e Angulo *et al.* (*op. cit.*) corroboram os resultados obtidos por Limbachiya *et al.* (*op. cit.*), tendo como denominador comum, o facto os três autores terem identificado a presença de quartzo, de calcite e de feldspato em amostras de  $\text{AB}_{\text{RCD}}$ .

Na tabela 2.26 apresentam-se os resultados obtidos da análise mineralógica realizada por Angulo *et al.* (2009). Estes evidenciam a influência da granulometria na amostra GS sobre a sua composição mineralógica.

**Tabela 2.26** Composição mineralógica de amostras de  $\text{AB}_{\text{RCD}}$  (adaptado de Angulo *et al.*, 2009)

Mineral		9,5 - 4,8 mm	0,6 - 0,3 mm	<0,15 mm
<i>Microclina</i> ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )		45,0	48,0	29,0
<i>Albite</i> ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )		19,0	18,0	9,0
<i>Quartzo</i>		10,0	10,0	12,0
<i>Moscovite/Biotite</i> ( $\text{K(Mg,Fe)}_3(\text{OH,F})_2(\text{Al,Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}$ )	(%)	19,0	16,0	17,0
<i>Caulinite/Ilite</i> (%)		1,0	3,0	17,0
<i>Gibbsite</i> ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )		-	-	2,0
<i>Calcite</i>		6,0	5,0	14,0

#### 2.4.1.5.3 - Caracterização geométrica, física e mecânica

As propriedades geométricas, físicas e mecânicas dos RCD-R dependem, essencialmente dos seguintes fatores: (1) da origem e da composição dos RCD (Quebaud e Buyle-Bodin, 1999 *in* Leite, 2001; Fernandes *et al.*, 2009; Freire *et al.*, 2010); (2) do tipo de operações e processamentos a que os RCD são submetidos (Quebaud e Buyle-Bodin, 1999 *in* Leite, *op. cit.*; De Juan, 2009 *in* Martin-Morales *et al.*, 2010; Hendricks e Jansen, 2003 *in* Barbudo *et al.*, 2012); (3) dos equipamentos utilizados durante as etapas de processamento dos RCD; e (4) do teor de impurezas presentes na composição dos RCD (Jadovski, 2005). Deste modo, tanto os RCD-R processados em diferentes centrais de reciclagem (Martin-Morales *et al.*, *op. cit.*), como os processados na mesma central, podem apresentar propriedades distintas, neste último caso, explicado, segundo De Juan (2004) pelo facto dos RCD enviados para uma determinada central de reciclagem poderem derivar de diferentes fontes.

Em termos de propriedades geométricas, a granulometria dos  $AB_{RCD}$  é variável e depende do processo e do equipamento utilizado durante a fase de britagem dos RCD (Leite, 2001; Etxeberria, 2004; Barra, 1996 *in* Jadovski, 2005; Lima, 1999 e Angulo, 2000 *in* Tenório, 2007; Ferreira, 2007 *in* Pestana, 2008; Martín-Morales *et al.*, 2010), da qualidade do betão de origem (Kikuchi *et al.*, 1998 *in* Leite, *op. cit.*; Ferreira, 2007 e Gonçalves, 2007 *in* Pestana, *op. cit.*) e da forma dos agregados naturais britados que compõem o betão (Ferreira, 2007 *in* Pestana, *op. cit.*). Os  $AB_{RCD}$  “(...) podem apresentar curvas granulométricas muito próximas às dos agregados naturais, no entanto, tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa (...)” (Jadovski, *op. cit.*). Além disso, os constituintes da sua fração fina podem-se apresentar maiores e mais angulares que nos agregados naturais (*ibid.*). Leite (*op. cit.*), Di Niro *et al.* (1999 *in* SAMARIS, 2004) e Carneiro *et al.* (2001 *in* Jadovski, *op. cit.*) referem que o  $AB_{RCD}$  possui um coeficiente de forma similar ao agregado natural obtido da britagem de uma rocha calcária, mas uma forma mais irregular, angular e uma textura superficial mais áspera e porosa (Leite, *op. cit.*; Jadovski, *op. cit.*; Gayarre, 2008; *Federal Highway Administration* - FHWA, 1997 *in* Leite *et al.*, 2011), em virtude da sua matriz cimentícia, conforme conclui Leite (*op. cit.*) e Gonçalves (2007). De acordo como Hamassaki *et al.* (1996 *in* Leite, *op. cit.*), a superfície dos agregados naturais pode ser classificada como praticamente polida, enquanto que a dos  $AB_{RCD}$ , como áspera a muito áspera, sendo a argamassa, a principal responsável por tal característica.

Do ponto de vista físico, refira-se que o  $AB_{RCD}$  apresenta uma massa volúmica específica variável entre 1,97 Mg/m<sup>3</sup> e 2,59 Mg/m<sup>3</sup> para a sua fração fina e entre 2,12 Mg/m<sup>3</sup> e 2,43 Mg/m<sup>3</sup> para a sua fração grossa (Jadovski, *op. cit.*), sendo os valores apresentados inferiores aos obtidos para os agregados naturais (Leite, *op. cit.*; Etxeberria, *op. cit.*; FHWA, 1997 *in* Leite *et al.*, *op. cit.*; Martín-Morales *et al.*, *op. cit.*; Evangelista e De Brito, 2007 e González-Fonteboa e Martínez-Abella, 2008 *in* Barbudo *et al.*, 2012) na ordem dos 5% a 10% (Bazuco, 1999 *in* Leite, *op. cit.*; SAMARIS, *op. cit.*; Hansen e Narud, 1983 *in* Jadovski, *op. cit.*). Vázquez *et al.* (2006 *in* Gonçalves, *op. cit.*) referem, por seu turno, que a massa volúmica (não especificada pelo autor) do  $AB_{RCD}$  pode variar entre 2,1 Mg/m<sup>3</sup> e 2,4 Mg/m<sup>3</sup>, e a massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca entre 2,3 Mg/m<sup>3</sup> e 2,5 Mg/m<sup>3</sup>. Outros autores como Topçu e Gunçan (1995, Dessy *et al.*, 1998, Masur *et al.*, 1999 e Carneiro *et al.*, 2000 *in* Leite, *op. cit.*), e Tam *et al.* (2008) obtiveram valores de massa volúmica da mesma ordem de grandeza dos valores apresentados por Vázquez *et al.* (2006 *in* Gonçalves, *op. cit.*).

A menor massa volúmica dos  $AB_{RCD}$  comparativamente à dos agregados naturais resulta da sua matriz cimentícia que apresenta uma porosidade elevada (Etxeberria, *op. cit.*; Hansen e Narud, 1983 *in* Jadovski, *op. cit.*; Paravithana e Abbas, 2006 *in* Zhao *et al.*, 2010), sendo tanto menor quanto maior for o volume de argamassa ligada aos agregados naturais britados que compõem o betão (Gonçalves, *op. cit.*; Tam *et al.*, *op. cit.*; Martín-Morales *et al.*, *op. cit.*). Ainda assim, Leite (*op. cit.*) não deixa de referir que o método de ensaio utilizado para a determinação da massa volúmica dos  $AB_{RCD}$  pode exercer uma certa influência na determinação da referida propriedade física, principalmente no caso da sua fração fina, em função da sua maior porosidade, absorção e fragilidade do agregado reciclado.

Em termos de capacidade de absorção de água, Jose (2002, Katz, 2003 e Rao, 2005 *in* Rao *et al.*, 2007) e Gómez-Sobero (2002 *in* Martín-Morales *et al.*, 2011) referem que os valores para várias frações granulométricas do  $AB_{RCD}$  podem variar entre 3% e 12%, dependendo do tipo de betão e do processamento a que foi sujeito. Jadovski (2005), por seu turno, tendo por base os vários autores consultados durante a sua pesquisa bibliográfica, refere que para a fração fina dos  $AB_{RCD}$ , os valores de absorção de água estão compreendidos entre 8,15% e 12%, e para a sua fração grossa, entre 3,6% e 8%. Esta propriedade física é umas das propriedades que mais diferencia os  $AB_{RCD}$  dos agregados naturais (Etxeberria, 2004; Gonçalves, 2007), sendo normalmente superior no caso dos primeiros (Martín-Morales *et al.*, *op. cit.*; FHWA, 1997 *in* Leite *et al.*, 2011; Evangelista e De Brito, 2007 e González-Fontebola e Martínez-Abella, 2008 *in* Barbudo *et al.*, 2012).

Na tabela 2.27 apresentam-se alguns valores obtidos por Hansen e Narud (1983 *in* Etxeberria, *op. cit.*) para a massa volúmica e a absorção de água de amostras de  $AB_{RCD}$ . Os dados apresentados corroboram o já descrito sobre as propriedades físicas abordadas ao demonstrarem uma relação entre estas e o volume de argamassa ligada aos agregados naturais britados que compõem o betão.

**Tabela 2.27** Propriedades físicas de amostras de  $AB_{RCD}$  (adaptado de Etxeberria, 2004)

Material	Fração granulométrica (mm)	Massa volúmica (a) ( $Mg/m^3$ )	Absorção de água (%)	Volume de argamassa ligada ao agregado natural (%)
$AB_{RCD}$ (H)	4 - 8	2,34	8,5	58
	8 - 16	2,45	5,0	38
	16 - 32	2,49	3,8	35
$AB_{RCD}$ (M)	4 - 8	2,35	8,7	64
	8 - 16	2,44	5,4	39
	16 - 32	2,48	4,0	28
$AB_{RCD}$ (L)	4 - 8	2,34	8,7	61
	8 - 16	2,42	5,7	39
	16 - 32	2,49	3,7	25

Legenda: (H) betão de resistência mecânica elevada processado em britador de mandíbula; (M) betão de resistência mecânica média processado em britador de mandíbula; (L) betão de resistência mecânica baixa processado em britador de mandíbula; (a) massa volúmica saturada com a superfície seca

Do ponto de vista mecânico, o  $AB_{RCD}$  apresenta-se menos resistente ao desgaste e à fragmentação que os agregados naturais (Leite, 2001; Etxeberria, *op. cit.*; Tavakoli e Soroushian, 1996 *in* Jadovski, *op. cit.*), facto que se deve à menor capacidade resistente da sua argamassa (Gomes, 2007 e Alves, 2007 *in* Pestana, 2008) e à fraca ligação desta com os agregados naturais que o compõem (Jadovski, *op. cit.*). Hansen e Narud (1983, Tavakoli e Soroushian, 1996 e Bazuco, 1999 *in* Jadovski, *op. cit.*) e Hasaba (1981, Japanese Investigation, 1978 e Yoshikane, 2000 *in* Etxeberria, *op. cit.*) procederam à realização de ensaios de *Los Angeles* para a determinação da resistência à fragmentação dos  $AB_{RCD}$  tendo obtido valores entre 20% e 44%, que se traduziram em perdas relativamente superiores às obtidas com os agregados naturais, no caso entre 19% e 25%. De Juan (2004), por seu turno, com base na bibliografia consultada aponta para valores do coeficiente de *Los Angeles* entre 12% e 43%. Etxeberria, (*op. cit.*) e Vázquez *et al.* (2006 *in* Gonçalves, *op. cit.*) referem, contudo, que o coeficiente de *Los Angeles* do  $AB_{RCD}$  é influenciado pela dimensão das partículas ensaiadas, pela qualidade do betão original em termos de comportamento mecânico e pelo coeficiente de *Los Angeles* dos agregados naturais britados que compõem o betão. No caso

particular da dimensão das partículas, quando as amostras de AB<sub>RCD</sub> ensaiadas são compostas por frações granulométricas específicas, LNEC (2008) refere que o resultado dos ensaios para a avaliação da resistência ao desgaste e à fragmentação deve ser analisado com algumas reservas já que podem não ser representativos da totalidade do agregado.

Em complemento à informação já apresenta, na tabela 2.28 e 2.29 mostram-se outros resultados igualmente referentes a propriedades geométricas, físicas e mecânicas do AB<sub>RCD</sub>. Na tabela 2.28, os mesmos são comparados com os resultados obtidos para um agregado natural, observando-se o já mencionado na presente secção.

**Tabela 2.28** Comparação entre as propriedades de amostras de AB<sub>RCD</sub> e de granito

Prop.	Parâmetro		LNEC (2008)	Pestana (2008)	Ferreira (2010)
			AB <sub>RCD</sub>		Granito
Geométricas	Granulometria	D <sub>max</sub> (mm)	63,0	31,5	38,5
		Cu	5	16	63,3
		Cc	1,25	4	2,8
		Finos (<0,074 mm) (%)	3,9	3,8	7,6
	Índice de achatamento (%)		5	14	≤20
	Índice de forma (%)		12	19	≤20
Físicas	Massa volúmica (Mg/m <sup>3</sup> )	Material impermeável	2,60 - 2,62	-	2,68
		Partículas saturadas	2,22 - 2,28	-	2,62
		Partículas secas	2,37 - 2,41	-	2,59
	Absorção de água (%)		5,8 - 6,7	-	1,2
	Equivalente em areia (%)		80	83	40
	Valor de azul de metileno (g/1000 g)		3	7	2
Mec.	Los Angeles (%)		(a)	44	≤40
	Micro-Deval (%)		28	48	≤20

Legenda: Propriedades - Prop.; Mecânicas - Mec.; (a) não foi possível obter material suficiente na fração 10 mm - 14 mm

**Tabela 2.29** Resultados dos ensaios de compactação Proctor com amostras de AB<sub>RCD</sub>

Autor	Energia de compactação	Massa volúmica seca máxima (Mg/m <sup>3</sup> )	Teor em água (%)
Bennert et al. (2000 in Pestana, 2008)	normal	1,87	5,0
Nataatmadja e Tan (2001 in Pestana, 2008)	modificada	1,96	9,5
Ribeiro et al. (2002 in Pestana, 2008)	intermédia	1,76	18,2
Fernandes (2004 in Pestana, 2008)	intermédia	1,82	15,2
	modificada	1,87	14,1

#### 2.4.1.6 - Valorização dos RCD-R na construção

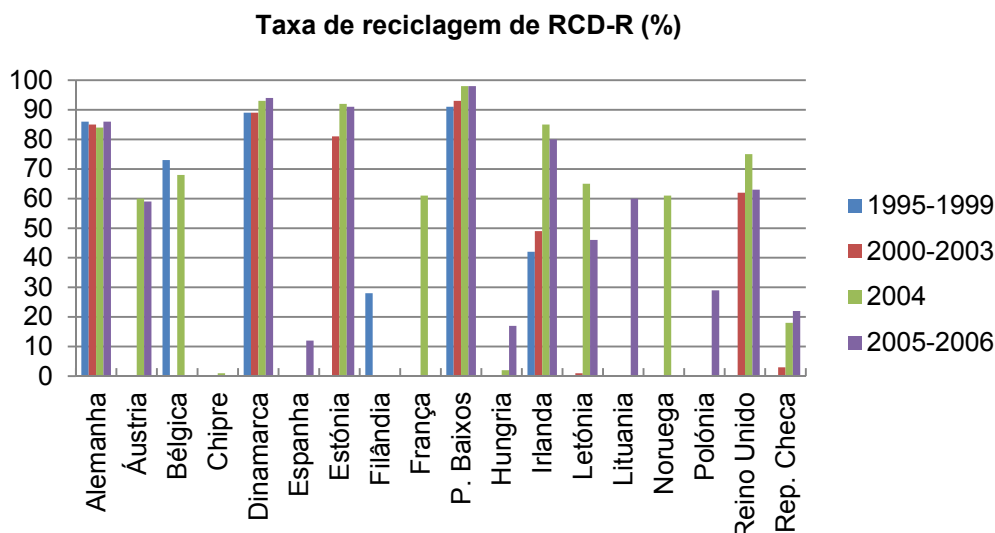
O uso significativo dos RCD-R na Europa e nos EUA veio a acontecer após a Segunda Guerra Mundial (Stein, 1996 in Rodriguez et al., 2007; Khalaf et al., 2004 in Rao et al., 2007; Nataatmadja e Tan 2001 in Leite, 2007; Pestana, 2008; Schulz e Hendricks., 1992 in Leite et al., 2011) “(...) em resposta à necessidade de se satisfazer a enorme demanda por materiais de construção e à necessidade de remover os escombros das cidades europeias” (Schulz e Hendricks, 1992 in LNEC, 2010).

Desde então, “(...) diversas instituições de Investigação e Desenvolvimento - I&D, têm tido um papel importante na promoção da utilização de resíduos (...)”, entre os quais os RCD, mediante a

realização e a publicação de inúmeros estudos de investigação com vista à caracterização ambiental, química, física e mecânica dos resíduos, e através “(...) da participação em projetos de demonstração, para estabelecimento do processo construtivo, caracterização estrutural e avaliação do comportamento a longo prazo” (Fortunato *et al.*, 2009). Como exemplo prático do exposto referem-se o relatório “*Recycling Strategies for Road Works*” desenvolvido pela OCDE (1995 in SAMARIS, 2004), o relatório “*Recycled Materials in European Highway Environments. Uses Technologies and Policies*” publicado pela *Federal Highway Administration of the United States Department of Transportation* (2000 in SAMARIS, *op. cit.*), o Projeto “*ALT-MAT: Alternative Materials in Road Construction*” publicado pelo consórcio ALT-MAT (2001 in SAMARAS, *op. cit.*) e o relatório “*Literature Review of Recycling of By-products in Road Construction in Europe*” inserido no projeto SAMARIS (*op. cit.*). O projeto “*ALT-MAT: Alternative Materials in Road Construction*” foi desenvolvido com o intuito de definir métodos para a avaliação da adequabilidade dos materiais alternativos na construção de infraestruturas rodoviárias (Cordis, 2000 in Fortunato *et al.*, *op. cit.*), ao passo que o relatório “*Literature Review of Recycling of By-products in Road Construction in Europe*” teve como objetivo servir de apoio técnico às políticas seguidas pelos estados-membros da UE no âmbito da gestão de resíduos e de um desenvolvimento sustentável (SAMARIS, *op. cit.*).

Com a sucessiva publicação de resultados de investigações realizadas, os estados-membros da UE, entre outros países, procederam à elaboração de documentos legislativos, normas e guias de utilização (Collinse e Nixon, 2003 e Van Gerven *et al.*, 2005 in Martin-Morales *et al.*, 2011), conforme já referido na secção 2.2, como meio de encorajamento para a reutilização e reciclagem de agregados reciclados em detrimento da sua deposição em aterro, e de controlo e aprovação da utilização daqueles agregados perante as entidades produtoras de RCD. Nos dias atuais, a reciclagem de RCD encontra-se implantada e consolidada em alguns estados-membros da UE, no Japão e nos EUA (LNEC, 2010), com os agregados reciclados resultantes do processamento de RCD a serem reconhecidos no mercado como agregados equivalentes aos agregados naturais correntemente utilizados como materiais de construção (UBA, 2008). Ainda assim, a deposição dos RCD em aterro continua a figurar como uma prática corrente na maioria dos países (Ruivo e Veiga, 2004; UBA, *op. cit.*), se consideramos, p. ex., que no espaço europeu, a taxa média de reciclagem cifra-se pelos 30%.

Na figura 2.14 representa-se graficamente a taxa de reciclagem de RCD-R verificada em vários estados-membros da UE entre os anos de 1995 e 2006.



**Figura 2.14** Reciclagem de RCD-R em percentagem da quantidade produzida (adaptado de Fortunato *et al.*, 2009)

No que concerne ao potencial de valorização dos RCD-R, reconhece-se que este tipo de agregado reciclado contém percentagens elevadas de materiais, entre 50% e 80% de acordo com Bossink e Brouwers (1996 *in* Rodríguez *et al.*, 2007), passíveis de serem reutilizados e reciclados (Costa *et al.*, 2005; UBA, 2008; JRC-IES, 2011). As qualidades evidenciadas por parte da fração inerte do RCD-R, nomeadamente em termos de características e comportamentos geotécnicos, em diversas aplicações como sejam no processo construtivo de aterros e de betões, ou em camadas granulares de pavimentos rodoviários (Martinho, 2004 *in* Martinho *et al.*, 2008c) permitem que se proceda à substituição dos agregados naturais por aqueles agregados reciclados, com estes a superarem as exigências preconizadas nos cadernos de encargos tradicionais (Martinho *et al.*, 2008b). Ainda assim, “(...) embora possam ser usados numa grande variedade de aplicações, a variabilidade do resíduos e as características de resistência limitam o seu uso para aplicações mais exigentes” (Costa *et al.*, *op. cit.*), sendo por isso fundamental que todas as operações de processamento a que os RCD são sujeitos com vista à sua valorização sejam realizadas de forma criteriosa, responsável e eficaz.

#### **2.4.1.6.1 - Sistemas de drenagem**

Os RCD-R podem ser utilizados em camadas de drenagem do sistema de proteção basal ativo (Gonçalves, 2007) e do sistema de selagem final de aterros de resíduos (Fatta *et al.*, 2003; Poon *et al.*, 2001 *in* Rodrigues *et al.*, *op. cit.*; Tam e Tam, 2006 *in* Zhao *et al.*, 2010), como elementos de filtro em fossas sépticas, e como drenos em trincheiras e valas subterrâneas (Gonçalves, *op. cit.*). Este último autor refere, ainda, que os RCD-R que podem ser utilizados na construção de “(...) estacas de brita para acelerar recalques e melhorar a capacidade de carga em depósitos de solos moles”, desde que mantenham a capacidade de drenagem para assegurarem a consolidação, que sejam quimicamente inertes e que apresentem uma baixa expansibilidade na presença de água.

Com vista à avaliação da adequabilidade da valorização dos RCD-R em camadas de drenagem dos aterros de resíduos, identificaram-se na bibliografia consultada os estudos realizados por Affonso (2005) e por Batista *et al.* (2009), com ambos a concluírem que os RCD-R preenchem os requisitos para poderem desempenhar funções na referida aplicação. No caso particular do estudo desenvolvido por Affonso (*op. cit.*), este obteve valores de permeabilidade superiores aos necessários para a remoção diária do lixiviado, concluindo que o material apresenta permeabilidade suficiente para a função a desempenhar, enquanto que, em relação à resistência à compressão, o mesmo autor refere que o material sofreu alguma fragmentação quando submetido a uma carga de 1800 kPa, o que representa uma altura de 190 m de resíduos sobre a camada drenante. No entanto, dado a altura em aterros de resíduos raramente ultrapassar os 100 m, Affonso (*ibid.*) concluiu que, relativamente a este parâmetro, os RCD-R também se mostraram aptos para desempenhar as funções pretendidas.

#### **2.4.1.6.2 - Outras aplicações**

Os RCD-R são utilizados sobretudo na construção de camadas de pavimento de infraestruturas rodoviárias (Symonds Group, 1999; ALT-MAT, 2001; IBGE-BIM, 2006 *in* UBA, 2008), nomeadamente na base e na sub-base, devido à sua resistência mecânica (Zhao *et al.*, 2010), à sua adequada capacidade de drenagem (FHWA *in* Leite, 2007) e ao facto de serem materiais não expansivos (Kryckij e Trichês, 2000 e Melbouci, 2009 *in* Leite *et al.*, 2011). Existem, ainda, outras aplicações, tais como: (1) a produção de betão (SAMARIS, 2004; Rao *et al.*, 2007; Gonçalves, 2007; Batista *et al.*, 2009; Tam e Tam, 2006 *in* Zhao *et al.*, *op. cit.*); (2) a produção de argamassa (SAMARIS, *op. cit.*; Gonçalves, *op. cit.*; Pestana, 2008; Neves, 2011), a solução mais comum para a fração fina dos RCD-R (Gonçalves, *op. cit.*); e (3) em camadas não ligadas (Neves, *op. cit.*) ou com adição de cimento, com função de sub-base ou de sub-balastro em estradas e caminhos-de-ferro, respetivamente (Fortunato *et al.*, 2009).

A utilização na construção de pavimentos rodoviários, particularmente em camadas de base e sub-base, é a forma mais simples, comum e económica para a reutilização de RCD-R como agregado reciclado (Symonds Group, *op. cit.*; Gonçalves, *op. cit.*; Pestana, *op. cit.*), existindo já uma ampla experiência nesse campo conforme se pode verificar da consulta dos inúmeros trabalhos publicados (Dos Santos, 2007; Martinho *et al.*, 2008b) ou de estudos de investigação nacionais e internacionais (Poon e Chan, 2006 *in* Leite, *op. cit.*; Pestana, *op. cit.*; Fernandes *et al.*, 2009; Ferreira, 2009; Freire *et al.*, 2011; Park, 2003, Vegas *et al.*, 2008 e Jiménez *et al.*, 2011 *in* Galvín *et al.*, 2011; O'Mahony e Milligan, 1997, Bennert *et al.*, 2000 e Motta, 2005 *in* Leite *et al.*, 2011; Leite *et al.*, *op. cit.*).

De facto, desde há muito tempo que existe a preocupação de utilizar os RCD-R na construção de infraestruturas rodoviárias (OCDE, 1977 e 1997 *in* Fortunato *et al.*, 2009), dado que, já em 1992, o manual Francês de terraplanagens rodoviárias (*cf. Guide Technique pour les Remblais et couches de forme* - GTR) para a construção de aterros e camadas de leito contemplava a utilização dos RCD-R (LPCP/SETRA, 1992 *in* Fortunato *et al.*, *op. cit.*). Nos últimos anos e em diversos estados-membros da UE tem-se verificado uma intensa utilização do referido agregado reciclado na

construção rodoviária (SAMARIS, 2004; Fortunato *et al.*, 2009), “(...) quer em aterros estruturais, quer em camadas de base e de sub-base de pavimentos ou em camadas de desgaste” (Fortunato *et al.*, *op. cit.*). No sentido oposto, nos Países Baixos, com enorme tradição na reciclagem de RCD-R, iniciou-se há poucos anos o debate sobre a necessidade de se diversificar as aplicações, visto grande parte dos materiais serem aplicados apenas em bases de estradas (Broere, 2003 *in* Fortunato *et al.*, *op. cit.*).

A utilização de RCD-R na produção de betão é menos comum nos estados-membros da UE (Symonds Group, 1999; UBA, 2008) por se tratar de uma aplicação cuja viabilidade técnica ainda não gera total consenso (Gonçalves, 2007). Pelo contrário, em países como os EUA, é uma das principais áreas de valorização daquele agregado, visto que dos  $2,7 \times 10^9$  ton de RCD produzidos todos os anos, entre 60% e 70% são reutilizados na produção de betão (Gilpin *et al.*, 2004 *in* Rao *et al.*, 2007). Diversos estudos de investigação como os desenvolvidos por Leite (2001), Etxeberria (2004), Zakaria e Cabrera (1996, Limbachiya *et al.*, 2000, Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001, Ajdukiewicz e Kliszczewicz, 2002, Corinaldesi e Morioni, 2002 e Olorunsogo e Padayachee, 2002 *in* Bianchini *et al.*, 2005), Meinhold *et al.* (2001 e Limbachiya, 2004 *in* Limbachiya *et al.*, 2006), Etxeberria *et al.* (2007), Limbachiya (*et al.*, 2000 *in* Gonçalves, *op. cit.*), e Rao *et al.* (*op. cit.*) atestam e reforçam a opção tomada pelos EUA, ao validarem os RCD-R, em particular o  $AB_{RCD}$ , como um tipo de agregado a utilizar na produção de betão. De acordo com Gonçalves (*op. cit.*), a experiência prática até agora adquirida na produção de betão produzido com  $AB_{RCD}$  permite concluir que o produto final é de tão fácil mistura, transporte, aplicação e compactação comparativamente como no betão convencional. Porém, devido à capacidade de absorção de água elevada dos  $AB_{RCD}$ , recomenda-se a sua pré-saturação (Hansen, 1986 *in* Gonçalves, *op. cit.*; Martín-Morales *et al.*, 2011).

Para além das duas principais aplicações abordadas, segundo Fortunato *et al.* (*op. cit.*), são escassas as referências a outras aplicações de RCD-R na bibliografia. Todavia, tem-se enveredado pela busca de novas áreas de aplicação conforme se comprova pelo projeto desenvolvido em Hong Kong (tabela 2.30), em que os  $AB_{RCD}$  foram empregues na construção de um aterro de fundação de uma obra marítima de grande envergadura (Yueng *et al.*, 2006 *in* Fortunato *et al.*, *op. cit.*).

Em Portugal, existem alguns exemplos de reutilização de RCD-R em obras geotécnicas, como é o caso da construção das camadas de leito do pavimento e de base no UNOP 1 e 2 de Tróia (Martinho *et al.*, 2008c), e das camadas de leito na ligação ferroviária ao Porto de Aveiro (Claro *et al.*, 2009). Fortunato *et al.* (*op. cit.*) aponta outros exemplos, como sejam: a demolição do pavilhão Dramático de Cascais; a demolição da Praça de Touros de Cascais; a demolição da ETAR de Alcântara em Lisboa; e a demolição do Edifício Bartolomeu Dias, igualmente em Alcântara, tendo os agregados reciclados resultantes das operações de demolição sido reutilizados na própria obra durante a fase de construção, no seu todo, ou apenas em parte.

Na tabela 2.30 e 2.31 apresentam-se alguns de exemplos de valorização dos RCD-R.



**Tabela 2.30** Utilização de RCD-R em infraestruturas rodoviárias e obras geotécnicas (adaptado de Fortunato *et al.*, 2009)

Origem	Aplicação	Local	Data	Autor
<b>RCD-R - pavimento antigo</b>	Camada de sub-base	Áustria: A1- Viena	1990	Sommer (1994)
<b>AB<sub>RCD</sub></b>	Camada de sub-base	França: RN 6	1982	SETRA (1984)
<b>Fração 0 - 20 mm obtida como subproduto de britagem de RCD</b>	Aterro rodoviário (50000 m <sup>3</sup> )	Espanha (Cádiz)	2004	Celemin (2005)
<b>RCD-R</b>	Base e sub-base	Espanha (Barcelona)	Vários anos	Fernández (2002)
<b>RCD-R</b>	Sub-base	Noruega: Autoestrada E6	2003	Aurstad <i>et al.</i> (2009)
<b>RCD-R - pavimento antigo</b>	Sub-base	Austrália: Autoestrada M4	1998	PIARC (2007)
<b>RCD-R - pavimento antigo</b>	Base e sub-base	Austrália: Estrada em Welshpool	2008	Leek (2008)
<b>RCD-R - edifícios demolidos no local</b>	Sub-base	Portugal (Lisboa): ParqueExpo	1998	Silveira (2002)
<b>RCD-R - edifícios demolidos no local</b>	Aterro e coroamento	Portugal (Barreiro): Fábrica de adubos	2000	Costa (2005)
<b>RCD-R - edifícios demolidos no local</b>	Aterro	Portugal (Mourão): Fábrica da Portucel-Recicla	2002	Costa (2005)
<b>RCD-R da demolição do estádio das Antas</b>	Aterro	Portugal (Porto): Dolce Vita	2004	BCSD (2006)
<b>RCD-R</b>	Aterro de fundação de obra marítima	Hong Kong	2002	Yeung <i>et al.</i> (2006)
<b>RCD-R</b>	Aterro em obras de reparação de serviços	Brasil (Piracicaba)	2006	Vedroni e Carvalho (2006)
<b>RCD-R</b>	Sub-base	Reino Unido (Bracknell)	1994	WRAP (2009b)
<b>RCD-R</b>	Aterro, leito de pavimento e sub-base	Reino Unido (Londres)	2003	WRAP (2009c)
<b>RCD-R</b>	Aterro em obras de reparação de serviços	Itália (Roma)	2000	D'Andrea e Rossi (2005)

**Tabela 2.31** Destino final dos RCD-R (adaptado de Sousa *et al.*, 2004)

Material	Estádio do Boavista FC (Porto)	Fábrica de Fermentos Matosinhos	Estádio do FC do Porto (Porto)
<b>AB<sub>RCD</sub></b>	Desconhecida	Aterro para estruturas rodoviárias	Pavimentação no local da obra
<b>Metal</b>	Betão armado	Betão armado	Betão armado e candeeiros de iluminação
<b>Outros (plásticos e madeira)</b>	Desconhecida	Desconhecida	Entidades recicladoras

Legenda: Futebol Clube - FC

## 2.4.2 - Escórias de aciaria de FAE

### 2.4.2.1 - Considerações gerais

A produção do aço é encarada como um forte indicador do desenvolvimento económico de um país, com o seu consumo a crescer proporcionalmente à construção de edifícios, à execução de obras públicas e à produção de equipamentos, entre outros. Segundo os valores estatísticos apresentados pelo Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS (2008 *in* Ferreira, 2010), a produção mundial de aço bruto cresceu de 30x10<sup>6</sup> ton/ano em 1901 para 1,33x10<sup>9</sup> ton/ano em 2008, traduzindo-se num aumento na ordem de 4433% num período de 107 anos, ou seja, uma média de mais de 40% por

ano. Já de acordo com a *Worldsteel Association* (2011), em 2011, ter-se-á alcançado um máximo histórico correspondente a  $1,4 \times 10^9$  ton/ano de aço bruto produzido, com a China a ser a maior produtora do Mundo, responsável por cerca de 44% do valor total de produção mundial.

A produção do aço resulta de um de três tipos de processos caracterizados, cada um, por um tipo de forno distinto: o Siemens-Martin (*cf. Open Heart* - OH), o Conversor a Oxigénio - CO (*cf. Basic Oxygen Furnace* - BOF ou *Linz-Donawitz* - LD) e o FAE (Kneller *et al.*, 1994; Puy, 2007; Ferreira, 2010). Como subproduto geram-se escórias de aciaria que são definidas pela *National Slag Association* - NSA (2009a) como sendo um subproduto resultante da utilização de ferro ou de sucata metálica com cal no CO ou no FAE, respetivamente. A referência apenas a estes dois fornos resulta da progressiva diminuição do uso dos fornos OH para a produção de aço.

A utilização das escórias de aciaria pelo homem remonta ao ano de 1589, na Alemanha na produção de balas de canhão. Mais tarde, em 1840, começaram a ser utilizadas na produção de lã no País de Gales, em 1901, no fabrico de tijolos no Japão, e mais recentemente, em 1970, na construção de infraestruturas rodoviárias nos EUA, na França, no Japão e no Reino Unido, entre outros países (Branco *et al.*, 2004). Atualmente, devido à consciencialização da importância das questões ambientais associadas à produção elevada de resíduos por cada tonelada de aço produzido têm sido desenvolvidos estudos sobre as potencialidades da reutilização ou da reciclagem das escórias de aciaria de FAE processadas como agregados reciclados, que caso contrário continuariam a ser depositadas em aterros de resíduos.

No presente estudo, conforme referido na secção 1.2, pretende-se avaliar a viabilidade técnica da utilização de um agregado reciclado resultante do processamento das escórias de aciaria de FAE numa aplicação específica, contribuindo desta forma para fomentar a opção pela sua valorização em detrimento da sua deposição em aterro. Para tal, nesta secção abordam-se os aspetos considerados com interesse para o enquadramento das escórias de aciaria de FAE com o trabalho apresentado nesta dissertação, à semelhança do efetuado para os RCD.

Na secção 2.4.2.2 começa-se por fazer referência ao processo de produção das escórias de aciaria de FAE, seguido da apresentação da sua classificação (secção 2.4.2.3) e de alguns dados estatísticos referentes à sua produção a nível nacional (secção 2.4.2.4.1) e internacional (secção 2.4.2.4.2).

Na secção 2.4.2.5 tratam-se as características ambientais, químicas, mineralógicas, geométricas, físicas e mecânicas das escórias de aciaria de FAE processadas como meio de futura comparação, sempre que apropriado, com os resultados obtidos com o ASIC no âmbito desta dissertação e apresentados no capítulo 3. Em Portugal, as escórias de aciaria de FAE processadas são comercializadas com a designação ASIC, sendo esta, a abreviatura adotada no capítulo 3.

Na última secção, 2.4.2.6, apresentam-se as potenciais aplicações das escórias de aciaria de FAE processadas na construção civil.

#### 2.4.2.2 - Origem das escórias de aciaria de FAE

As escórias designam-se ferrosas ou não ferrosas consoante resultem, respetivamente, da produção de ferro ou de aço, ou da produção de cobre ou de ferro-níquel (*Nippon Slag Association - NiSA*, 2012). No caso das escórias de aciaria de FAE, o processo de produção de aço, durante o qual são originadas, tem início com o carregamento do FAE com sucata ferrosa (De Lima, 1999; Shi, 2004; Roque *et al.*, 2006) e compreende duas fases distintas (Roque *et al.*, *op. cit.*):

- a. fase de fusão; e
- b. fase de afinação, que inclui três etapas:
  - b.1 período de oxidação;
  - b.2 período de redução; e
  - b.3 período de afinação da composição final.

A fase de fusão tem início quando os elétrodos entram em contacto com a sucata ferrosa (figura 2.15), matéria-prima que representa até 95% do material utilizado na produção de aço (De Lima, *op. cit.*), promovendo desta forma a sua fusão mediante uma corrente elétrica (*ibid.*; Machado, 2000; Shi, *op. cit.*; Puy, 2007). Nesta fase adicionam-se ainda diversos componentes, entre os quais o oxigénio (O) puro (Branco *et al.*, 2004; Shi, *op. cit.*; Puy, *op. cit.*) e a cal, calcítica ou dolomítica (Puy, *op. cit.*; Wang *et al.*, 2010). Este último componente desempenha um papel importante durante todo o processo de produção, sendo utilizada na fase de fusão com o objetivo de neutralizar as impurezas presentes na sucata ferrosa (De Lima, *op. cit.*). A escória produzida no final da fase de fusão é designada escória negra ou escória oxidante (Roque *et al.*, *op. cit.*) e representa cerca de 80% das escórias produzidas ao longo do processo de produção de aço (De Lima, *op. cit.*; Branco *et al.*, *op. cit.*). Esta escória resulta da combinação da cal e de óxidos de magnésio (MgO) com as impurezas da sucata ferrosa (De Lima, *op. cit.*).

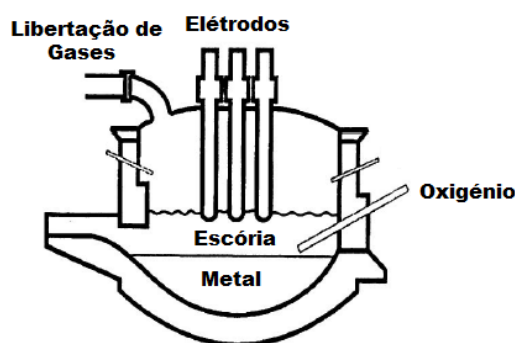


Figura 2.15 FAE (adaptado de Shi, 2004)

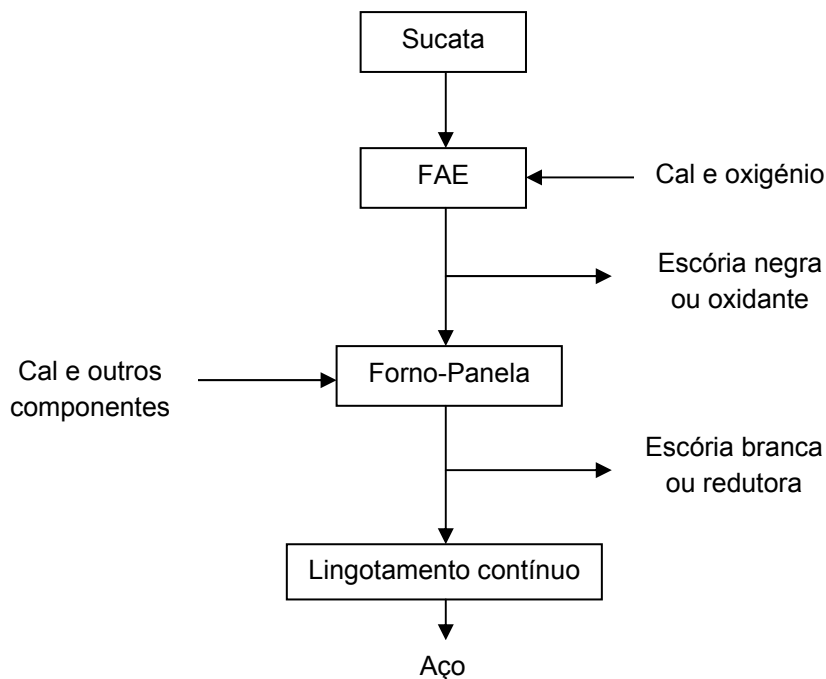
Na fase de afinação, período de oxidação, o forno é alimentado com o O a fim de eliminar os elementos indesejáveis do banho metálico, como o silício (Si), o manganês (Mn) e o fósforo (P), entre outros (Roque *et al.*, *op. cit.*). Ocorre também a formação de MgO e de óxidos de ferro (FeO) e de silício (SiO) que passam para a escória, a queima do carbono (C) que é eliminado sob a forma gasosa, e a ferverdura do banho (*ibid.*). No final do período de oxidação, a escória negra que flutua

sobre o banho líquido é retirada cuidadosamente (Roque *et al.*, 2006). A separação entre esta e o banho metálico é espontânea devido à imiscibilidade e à diferença de densidade entre os dois materiais líquidos (De Lima, 1999).

O período de redução tem por finalidade a obtenção de um metal com um teor baixo em O e em S (Roque *et al.*, *op. cit.*; Puy, 2007). Para tal, é adicionado cal como dessulfurante, espato que permite baixar o ponto de fusão da escória, e alguns componentes desoxidantes para a fixação do O (De Lima, *op. cit.*; Roque *et al.*, *op. cit.*). Neste período produz-se a designada escória branca ou escória redutora, desoxidante e dessulfurante (De Lima, *op. cit.*; Roque *et al.*, *op. cit.*). Para a desoxidação há que atender à sequência com que os componentes são adicionados, pelo que a ferroliga de Mg devem ser adicionada em primeiro lugar seguida da ferroliga de Si. Deste modo, é possível a formação de partículas líquidas no banho metálico, MgO e SiO<sub>2</sub>, que têm tendência a agregarem-se formando parte da constituição da escória (Puy, *op. cit.*). Paralelamente à desoxidação ocorre a dessulfuração na presença de uma quantidade suficiente de CaO e óxidos de carbono (CO), tendo por objetivo minimizar a presença de S no aço responsável pela perda de coesão dos cristais de ferro (*ibid.*).

Por último, no período de afinação da composição final ocorre o ajustamento dos componentes do banho metálico. Para o efeito, são adicionadas ferroligas em pequenas quantidades para melhorar as propriedades do banho, seguindo-se um período de espera de modo a que os componentes adicionados se dissolvam e a composição do banho se torne o mais homogênea possível (Roque *et al.*, *op. cit.*).

Na figura 2.16 apresenta-se um esquema onde se simplifica o processo de produção de aço descrito anteriormente.

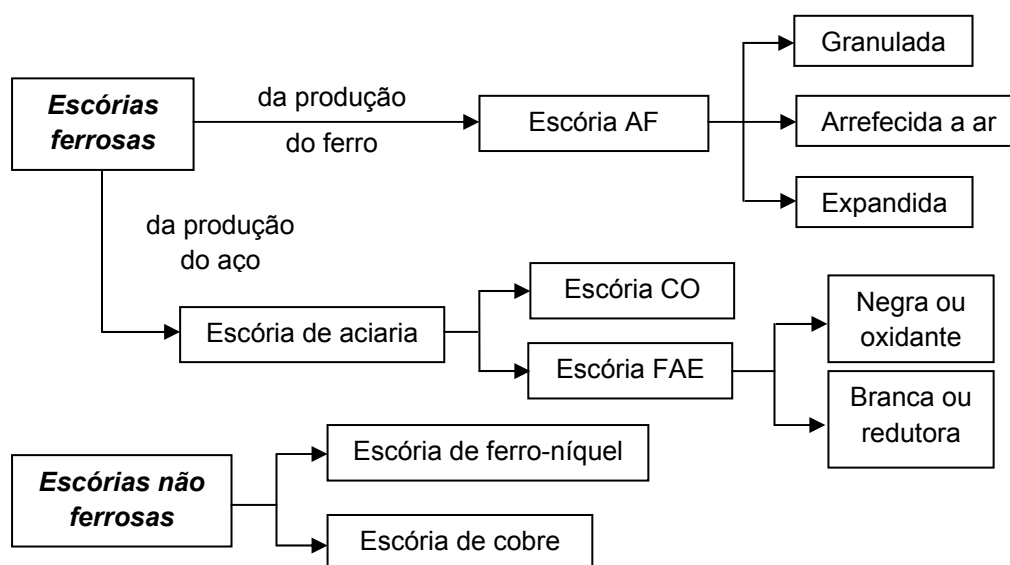


**Figura 2.16** Esquema simplificado da produção de aço nos FAE (adaptado de Rodhe, 2002)

As escórias são consideradas um elemento necessário ao longo do processo de produção do aço (Cavalheiro, 2007 *in* Ferreira, 2010), dado desempenharem diversas funções, como sejam: (1) a eliminação de impurezas, normalmente o S e o P, a não incorporar no aço; (2) a minimização da deterioração do refratário do FAE; (3) a redução do consumo de energia ao formar uma camada isolante sobre o banho metálico; e (4) o escoamento dos gases que se formam no decorrer do processo de produção. Particularmente em relação a esta última função, refira-se que os gases que se geram devem-se aos materiais orgânicos presentes na sucata ferrosa e aos componentes adicionados ao banho metálico que posteriormente dão origem às escórias (Ferreira, *op. cit.*).

#### 2.4.2.3 - Classificação das escórias de aciaria de FAE

Conforme referido na secção 2.4.2.2, as escórias podem pertencer a duas classes dependendo do processo que as origina: (1) escórias ferrosas, que resultam da produção de ferro ou de aço; e (2) escórias não ferrosas, que resultam da produção de cobre ou de ferro-níquel (figura 2.17). As primeiras são as mais conhecidas, quer pela sua crescente utilização em diversas áreas de aplicação, quer pelos valores de produção dos metais em questão.



Legenda: Alto-Forno - AF

**Figura 2.17** Tipos de escória (adaptado de De Lima, 1999; FHeS, 1992 *in* UBA, 2008; NSA, 2012)

As escórias resultantes da produção do ferro são designadas escórias de AF e agrupam-se segundo o processo de arrefecimento a que são submetidas, escórias de AF granuladas, arrefecidas a ar e expandidas. As escórias de aciaria que resultam da produção do aço dividem-se com base no tipo de forno utilizado, o CO ou o FAE. Apesar de não constar na figura 2.17, tanto durante o processo realizado com recurso ao CO, como o que recorre ao AF, são geradas escórias oxidantes. As escórias produzidas em fornos OH não são apresentadas na figura 2.17 devido à sua menor produção em resultado do forte declínio sofrido por esses fornos.

No caso particular das duas escórias de aciarias de FAE consideradas na figura 2.17, refira-se que a escória negra (figura 2.18a) é composta essencialmente por *Fe*, cálcio (Ca), *Si* e alumínio (Al) (De Lima, 1999), sendo a percentagem destes elementos químicos variável em função do tipo de sucata utilizada na produção de aço, e da qualidade e eficiência do controlo das variáveis que influenciam o processo de produção (Rodhe, 2002). Esta escória apresenta uma coloração escura (negra), aspeto vesicular e superfície irregular, sendo mais densa que a escória branca (Ferreira, 2010).

A escória branca (figura 2.18b), por seu turno, apresenta uma cor esbranquiçada, possui uma quantidade elevada de finos que provêm da pulverização do silicato bicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) durante o arrefecimento da escória, e pode, eventualmente, conter impurezas de *Fe* e fragmentos de escória negra (*ibid.*). Da sua composição química é de realçar a quantidade elevada de Ca, >45%, e de *Si*, >17%, e a presença reduzida, >1%, de *Fe* e de metais pesados como o cromo (Cr), o zinco (Zn) e o chumbo (Pb) (Rodhe, *op. cit.*). Contrariamente à escória negra, a escória branca não é valorizável em infraestruturas rodoviárias e/ou em outras obras de engenharia civil devido ao teor elevado em cal na sua composição química (SAMARIS, 2004). Ainda assim, em Espanha e em Portugal são utilizadas, respetivamente, como matéria-prima na produção de cimento e no processo de produção de aço.



**Figura 2.18** Escórias de aciaria de FAE: a) negra e b) branca (adaptado de Puy, 2007)

Na tabela 2.32 apresenta-se a composição típica das escórias negra e branca, sendo visível a diferença entre ambas em termos de concentrações dos seus elementos químicos.

**Tabela 2.32** Composição química das escórias negra e branca (adaptado de Puy, 2007)

Tipo de escória	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>tot</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO <sub>livre</sub>
<b>Negra</b>	25 - 40	10 - 17	18 - 30	2 - 15	3 - 10	5 - 7	0 - 1,5	0 - 3	<3
<b>Branca</b>	51	27	1,5	7	9	1	-	-	-

A par da classificação já apresentada nesta secção, refira-se que as escórias são também classificadas pela LER, mas apenas as ferrosas, incluindo-as no capítulo 10, designado “Resíduos de processos térmicos”. De acordo com a referida lista, os resíduos resultantes do processamento das escórias, nos quais se inclui o ASIC, pertencem ao subcapítulo 10 02 01, e as escórias não processadas, ao subcapítulo 10 02 02.

Nas secções seguintes, o termo escória de aciaria passa a ser empregue como sinónimo de escória de aciaria negra, lembrando que, em Portugal, a abreviatura ASIC é a designação comercial atribuída ao agregado reciclado resultante do processamento dessas escórias.

#### **2.4.2.4 - Produção das escórias de aciaria de FAE**

##### **2.4.2.4.1 - A nível nacional**

A indústria siderúrgica em Portugal surgiu em 1954, aquando da constituição da SN como uma S.A.. O arranque da produção ocorreu no Seixal, em agosto de 1961, seis anos e meio após a concessão do alvará que atribuiu à SN, o exclusivo desta indústria por um período de 10 anos (Guimarães, 2002). Em 2001, a SN foi privatizada, operando presentemente duas siderurgias em Portugal, uma localizada em Paio Pires, Seixal (SN do Seixal), e a outra em São Pedro de Fins, Maia (SN da Maia).

O complexo siderúrgico do Seixal, sob o ponto de vista da produção de aço, sempre se regeu pelas linhas dominantes da moderna tecnologia siderúrgica. Segundo Ferreira (2010), até 2001, a produção de aço situava-se perto de  $450 \times 10^3$  ton/ano e tinha por base a utilização do AF e do CO. Em menor escala era utilizado também o FAE, com os valores de produção a atingir apenas  $45 \times 10^3$  ton/ano. Com a privatização da SN, em 2002 instalaram-se novos FAE, e desde então foram produzidas cerca de  $600 \times 10^3$  ton de escórias de aciaria de FAE, tendo estas sido processadas na sua totalidade (*ibid.*).

O complexo siderúrgico da Maia, por seu turno, foi construído em 1976 e desde logo equipado com um FAE que atingiu valores de produção de aço próximos de  $330 \times 10^3$  ton/ano (*ibid.*). Em 2005 foram instalados novos FAE tecnologicamente mais avançados.

Em 2005, a SN do Seixal e da Maia produziram em conjunto cerca de  $1,5 \times 10^6$  ton de aço, a que corresponderam, aproximadamente,  $270 \times 10^3$  ton de escórias (*ibid.*). Já de acordo com dados mais recentes fornecidos por ambas as siderurgias, os valores de produção das escórias de aciaria de FAE poderão atingir a médio prazo cerca de  $400 \times 10^3$  ton/ano (Roque *et al.*, 2006).

Em termos médios, refira-se que por cada tonelada de aço líquido são produzidas entre 110 kg e 150 kg de escórias negras e entre 20 kg e 30 kg de escórias brancas (*ibid.*).

##### **2.4.2.4.2 - A nível internacional**

Na bibliografia consultada não foram identificadas estimativas relativas à produção das escórias de aciaria de FAE a nível mundial. No entanto, os valores de produção mundial de aço conjuntamente com os valores médios de produção das escórias de aciaria por cada tonelada de aço produzido podem servir de base para colmatar a referida falta de informação. É neste contexto que a seguir se apresentam as estimativas mais recentes sobre a produção de aço a nível mundial.

De acordo com a *Worldsteel Association* (2011), nos últimos 11 anos, a produção de aço aumentou cerca de 57%, com os países asiáticos, a China, a Coreia do Sul, a Índia e o Japão, a serem responsáveis por cerca de 64% das  $1,4 \times 10^9$  ton de aço produzido em 2011 (tabela 2.33). Em território europeu, a Alemanha, a Itália e a França são, segundo esta ordem, os três principais produtores, com valores anuais na ordem de  $44,3 \times 10^6$  ton,  $28,6 \times 10^6$  ton e  $15,7 \times 10^6$  ton, respetivamente. Entre os países da América do Sul, o Brasil é o principal produtor, com valores de produção próximos de  $32,9 \times 10^6$  ton.

**Tabela 2.33** Estimativas da produção de aço (adaptado de *Worldsteel Association*, 2011)

Região	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	(x10 <sup>6</sup> ton)						
<b>UE (27)</b>	195,5	206,9	210,2	198,2	139,4	172,6	177,4
<b>América do Norte</b>	127,6	131,8	132,6	124,5	82,6	111,6	118,9
<b>América do Sul</b>	45,3	45,3	48,2	47,3	37,8	43,9	48,3
<b>África</b>	17,9	18,7	18,7	17,0	15,3	16,6	14,0
<b>Ásia e Oceânia</b>	606,7	682,8	766,1	791,5	816,4	922,6	961,4
<b>Mundial</b>	1146,6	1249,0	1347,0	1341,2	1235,8	1428,7	1490,1

Do total de aço produzido, Geyer *et al.* (1997 in Araujo, 2008) referem que cerca de 34% resulta da utilização de FAE, ao passo que a *Worldsteel Association* (*op. cit.*), com base nas estimativas realizadas para o ano de 2011, aponta para um valor ligeiramente inferior, próximo de 29%.

No que respeita à quantidade de escórias de aciaria de FAE produzidas por cada tonelada de aço produzido, esta varia entre 100 kg/ton e 150 kg/ton (Graffitti, 2002). Este intervalo de valores não é contudo consensual, dado que p. ex. De Lima (1999) e Masuero (2001 in Araujo, *op. cit.*) apontam para valores ligeiramente diferentes. De Lima (*op. cit.*), da pesquisa realizada sobre as escórias de aciaria de FAE produzidas em Espanha, estimou um valor de produção próximo de 180 kg/ton por aço produzido, ao passo que segundo Masuero (2001), por cada tonelada de aço que se produz verifica-se uma produção entre 70 kg e 170 kg de escórias de aciaria de FAE.

O exposto na presente secção permite assim proceder à estimação da quantidade de escórias de aciaria de FAE produzidas a nível mundial no ano de 2011. Esta variou entre  $32,9 \times 10^6$  ton e  $84,5 \times 10^6$  ton, sendo estes valores muito idênticos aos apresentados por Araujo (*op. cit.*), que refere que todos os anos, a produção mundial de escórias de aciaria de FAE atinge, aproximadamente, as  $84 \times 10^6$  ton. Na Europa, de acordo com Motz e Geiseler (2001) e Aklın Altun e Ismail (2002 in Iacobescu *et al.*, 2011), os valores de produção são próximos de  $12 \times 10^6$  ton/ano.

#### **2.4.2.5 - Caracterização das escórias de aciaria de FAE processadas**

##### **2.4.2.5.1 - Avaliação da perigosidade ambiental**

Como referido na secção 2.4.1.5.1 para os RCD-R, a avaliação da adequabilidade das escórias de aciaria de FAE processadas como agregado reciclado a utilizar em obras de engenharia civil deve incluir o estudo do seu comportamento ambiental mediante a realização dos métodos já referidos naquela secção.



Na tabela 2.34 apresentam-se os resultados de ensaios de lixiviação realizados por De Lima, (1999), Polisseni, (2005) e Roque *et al.* (2006) com amostras de escórias de aciaria de FAE processadas. De Lima (*op. cit.*) comparou os resultados obtidos com os valores-limite dos parâmetros definidos no “Catálogo de Resíduos de Cataluña” (DOGC 2166, 1996) e na “Orden de Valorización de Escorias” (DOGC 2181, 1996), ao passo que Polisseni (*op. cit.*) e Roque *et al.* (*op. cit.*), igualmente como meio de comparação, utilizaram a NBR 10004 (2004) e o DL nº 152/2002, respetivamente.

**Tabela 2.34** Valores da lixiviabilidade de amostras de escória de aciaria de FAE processadas

Parâmetro		De Lima (1999) (a)		Polisseni (2005) (b)			Roque <i>et al.</i> (2006) (a)	
		E.1	E.2	E1	E2	E3	ASIC.1	ASIC.2
<b>COT</b>	(mg C/l)	-	-	-	-	-	3,8	-
<b>Arsénio, As</b>	(mg/l)	<0,1	<0,1	<0,01	<0,01	<0,01	<0,0018	-
<b>Bário, Ba</b>		-	-	1,57	0,87	0,71	-	-
<b>Cádmio, Cd</b>		<0,01	<0,01	<0,013	<0,004	<0,004	0,01	<0,009
<b>Cobre, Cu</b>		<0,01	<0,01	-	-	-	<0,025	<0,025
<b>Crómio VI</b>		-	-	-	-	-	<0,05	-
<b>Crómio total, Cr</b>		0,06	<0,01	<0,016	<0,016	<0,016	0,05	<0,05
<b>Mercúrio, Hg</b>		<0,002	<0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002	-
<b>Níquel, Ni</b>		<0,03	<0,03	-	-	-	<0,04	<0,04
<b>Chumbo, Pb</b>		0,23	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,06	<0,06
<b>Selénio, Se</b>		-	-	<0,003	<0,003	<0,003	-	-
<b>Zinco, Zn</b>		0,01	0,01	-	-	-	<0,008	<0,008
<b>Fenóis</b>		-	-	-	-	-	<0,01	-
<b>Cloreto, Cl</b>		-	-	-	-	-	<3	<3
<b>Fluoreto, F</b>		-	-	2,23	4,82	2,17	0,04	-
<b>Sulfato, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		-	-	-	-	-	<10	<10

Legenda: (E.1) escória de granulometria 0 mm - 5 mm; (E.2) escória de granulometria 100 mm - 150 mm; (E1) escória maturou 72 horas - h; (E2) escória maturou 6 meses; (E3) escória maturou 24 meses; (ASIC.1) escória maturou 3 meses; (ASIC.2) escória maturou 6 meses; (a) ensaio de lixiviação realizado de acordo com a norma *Deutsches Institut für Normung* - DIN 38414-S4 (1984); (b) ensaio de lixiviação realizado de acordo com a norma NBR 10005 (2004)

De Lima (*op. cit.*) e Roque *et al.* (*op. cit.*) concluíram que as escórias de aciaria de FAE estudadas enquadram-se na categoria dos resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, ao passo que Polisseni (*op. cit.*) classifica-as como resíduos não perigosos e não inertes. Outros autores como Urbina *et al.* (1996 *in* De Lima, *op. cit.*) e Sorlini *et al.* (2012) ao realizarem estudos idênticos aos apresentados nesta secção com o mesmo tipo de escórias obtiveram valores que corroboram o concluído por De Lima (*op. cit.*) e por Roque *et al.* (*op. cit.*).

A classificação da escória de aciaria de FAE processada como material inerte não deve, contudo, ser tomada como absoluta em virtude da enorme variabilidade das suas propriedades (Ferreira, 2010) e do facto do seu impacte ambiental depender do tipo de aplicação a que se destina (UBA, 2008). Neste contexto que Ferreira (*op. cit.*) alerta para a necessidade de se proceder a uma avaliação periódica das características ambientais daquele tipo de escórias, ainda que os resultados obtidos por Suer *et al.* (2009 *in* Pasetto e Baldo, 2010) refutam o proposto, dado que estes autores ao avaliar as propriedades de escórias de aciaria de FAE com 10 anos de utilização em sub-bases de pavimentos rodoviários não observaram alterações significativas nas suas propriedades, assim como no seu pH e nas concentrações dos seus elementos lixiviados.

Ainda no âmbito da avaliação do comportamento ambiental, deve ser tido em consideração a medição do pH da escória de aciaria de FAE processada, que de acordo com a bibliografia consultada pode variar entre 10 e 14 (De Lima, *op. cit.*; Rohde, 2002; Ferreira, *op. cit.*; Pasetto e

Baldo, 2010). Face à sua basicidade elevada, em resultado da presença de cal livre na sua composição (SAMARIS, 2004; Barca *et al.*, 2012), as escórias não devem ser utilizadas em obras geotécnicas situadas em zonas relativamente próximas a águas estagnadas, tais como poços e lagos, entre outros (Rohde, 2002), nem estar em contacto com tubagens de alumínio e galvanizadas podendo levar à corrosão daquele material (Ferreira, 2010).

#### **2.4.2.5.2 - Caracterização química e mineralógica**

##### *a) Composição química*

A composição química das escórias de aciaria de FAE processadas depende do processo de produção de aço (Coomarasamy e Walsak, 1995 *in* Polisseni, 2005; Altun e Yilmaz, 2002 *in* Araujo, 2008; Ferreira, *op. cit.*), da matéria-prima consumida (Coomarasamy e Walsak, 1995 *in* Polisseni, *op. cit.*; Altun e Yilmaz, 2002 *in* Araújo, *op. cit.*; NSA, 2009b; Wang *et al.*, 2010), do tipo e das especificações do aço produzido (Shi, 2004; NSA, *op. cit.*b; Wang *et al.*, *op. cit.*; Pasetto e Baldo, *op. cit.*) e do tipo de processamento a que as escórias de aciaria de FAE são sujeitas após o seu vazamento (Shi, *op. cit.*; UBA, 2008; Ferreira, *op. cit.*).

A título de exemplo, refira-se que as concentrações de alguns compostos presentes na composição química das escórias de aciaria de FAE como o  $\text{CaO}$  e o  $\text{MgO}$  dependem do tipo de fundente empregue: cal ou dolomite, respetivamente. Se, no primeiro caso, os valores de concentração dependem essencialmente da quantidade de cal adicionada e do método adotado para a maturação das escórias; no segundo, são função da quantidade de dolomite utilizada durante a produção de aço e da interação entre a escória e o revestimento refratário do FAE, constituído por material rico em  $\text{MgO}$  (Motz e Geiseler, 2001). A dissolução do refratário na escória tem como consequência o aumento da concentração de  $\text{MgO}$  na composição química da escória e a diminuição da sua qualidade (Puy, 2007). Desta forma é expectável que, tanto as escórias de aciaria de FAE processadas em diferentes siderurgias como as que são processadas diariamente numa determinada siderurgia, possam apresentar variações na sua composição química.

Machado (2000) cita, no seu trabalho, alguns dados referentes à composição química das escórias de aciaria de FAE processadas pela Usina Siderúrgica da Bahia que corroboram o acima exposto. De acordo com este, num dia normal de produção, os valores de concentração do  $\text{CaO}$ , do  $\text{SiO}_2$  e do  $\text{FeO}$  variam entre 34% e 59%, entre 15% e 28%, e entre 1% e 32%, respetivamente. Já de acordo com SAMARIS (*op. cit.*), UBA (*op. cit.*) e NSA (2009a), as escórias de aciaria de FAE processadas são compostas essencialmente por  $\text{CaO}$  e  $\text{FeO}$ , mas também por óxidos e compostos de  $\text{Mg}$ , de  $\text{Mn}$  e de  $\text{Al}$ , ainda que estes últimos surjam em concentrações menores. Shi (*op. cit.*) e Wang *et al.* (*op. cit.*) corroboram esta ideia quando consideram a aquele tipo escória como um material vulgarmente constituído por  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{FeO}$ , que, na sua totalidade, representam entre 88% e 92% da sua composição química.

Na bibliografia consultada foram identificados outros autores que estudaram a composição química das escórias de aciaria de FAE processadas, tais como: De Lima (1999); Masuero *et al.* (2000); Motz e Geiseler (2001); Geyer (2001); Graffitti (2002); Araújo (2008); Tsakiridis *et al.* (2008); Sofilic *et al.* (2010); Iacobescu *et al.* (2011); e aqueles que se apresentam na tabela 2.35. Os resultados obtidos pelos autores mencionados reforçam o já afirmado sobre a variabilidade da composição química das referidas escórias em termos de concentrações finais dos seus elementos químicos.

**Tabela 2.35** Composição química de amostras de escórias de aciaria de FAE processadas em diferentes países (adaptado de Pereira, 1994 e Geyer, 1994 *in* Geyer, 2001(\*); De Lima, 1999(\*\*); Puy, 2007(\*\*); Passeto e Baldo, 2010(\*\*\*)

Autor	País	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
		(%)							
(*)	<b>Alemanha</b>	32	10	15	4	31	4	1,4	0,1
	<b>Brasil</b>	33	10	18	6	30	5	-	-
	<b>EUA</b>	41	10	17	8	18	4	0,6	0,2
	<b>Itália</b>	41	8	14	7	20	6	0,9	0,1
	<b>Japão</b>	40	4	25	5	19	7	-	0,01
	<b>Suécia</b>	46	5	11	5	28	4	0,7	-
(**)	<b>Espanha</b>	(Madrid) (a <sup>1</sup> )	29,11	3,35	6,04	14,07	27,41	-	-
		(Madrid) (a <sup>2</sup> )	24,40	2,91	15,35	12,21	34,46	-	-
		(País Basco) (b <sup>1</sup> )	30,69	4,28	13,61	6,00	36,33	-	-
		(País Basco) (b <sup>2</sup> )	28,07	4,52	16,42	3,88	38,22	-	-
(***)		(Catalunha) (c)	31,0	5,0	14,0	9,0	27,0	4,0	0,4
(****)	<b>Itália</b>	<b>Escória tipo P (d)</b>	29,60	3,65	13,02	9,30	32,84	5,09	-
		<b>Escória tipo B (d)</b>	29,33	3,62	12,95	9,28	33,12	5,15	-

Legenda: (a<sup>1</sup>) siderurgia de Aristrain (Luxán, 1995); (a<sup>2</sup>) siderurgia de Azma (Luxán, 1995); (b<sup>1</sup>) siderurgia 1 (Urbina *et al.*, 1996); (b<sup>2</sup>) siderurgia 2 (Urbina *et al.*, 1996); (c) a título informativo de acordo com o documento nº 151\_15 do Departamento de Materiais de Construção da UPC, com os resultados a serem obtidos sobre um agregado reciclado resultante do processamento de escórias de aciaria de FAE produzidas na siderurgia de Celsa em Castellbisbal; (d) os autores não especificam a diferença entre as escórias de aciaria de FAE estudadas

A par dos resultados apresentados, é ainda de destacar a caracterização química das escórias de aciaria de FAE processadas na SN do Seixal e da Maia. Para o efeito, apresentam-se na tabela 2.36 os resultados obtidos por Roque *et al.* (2006) das análises químicas efetuadas por FRX sobre amostras de ASIC recolhidas com diferentes tempos de maturação. Na tabela não marcam presença espécies químicas cuja percentagem foi sempre inferior a 1%, como sejam os óxidos de sódio (Na<sub>2</sub>O), de potássio (K<sub>2</sub>O) e de titânio (TiO<sub>2</sub>), o vanádio (V), o cobre (Cu), o Zn, o estrôncio (Sr), o dióxido de zircónio (ZrO<sub>2</sub>) e o Ba. Os resultados apresentados correspondem à média dos valores obtidos para cinco amostras de ASIC caracterizadas.

**Tabela 2.36** Principais elementos químicos presentes na composição de amostras de ASIC da SN da Maia e do Seixal para 3 e 6 meses de maturação (adaptado de Roque *et al.*, 2006)

Espécie química		Amostra de ASIC recolhida na pilha com 3 meses de maturação		Amostra de ASIC recolhida na pilha com 6 meses de maturação	
		Seixal	Maia	Seixal	Maia
<i>Elemento principal (%)</i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	34,2	48,2	30,4	48,1
	<i>CaO</i>	34,0	24,2	35,2	23,8
	<i>SiO<sub>2</sub></i>	15,0	12,0	15,7	12,6
<i>Elemento secundário (%)</i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	6,2	4,2	5,8	3,6
	<i>Mn</i>	3,6	3,9	3,9	3,9
	<i>MgO</i>	3,0	2,7	4,4	3,3
	<i>Cr</i>	1,5	2,0	1,6	2,0
	<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,8	1,2	0,7	1,0
	<i>SO<sub>3</sub></i>	1,1	0,3	0,7	0,04

### b) Composição mineralógica

As escórias de aciaria de FAE processadas apresentam uma enorme variabilidade no que respeita à sua composição mineralógica, à semelhança do referido para a sua composição química, dependendo esta do processo de produção do aço e do método utilizado para o arrefecimento da escória (Machado, 2000; SAMARIS, 2004; Coomarasamy e Walsak, 1995 *in* Polisseni, 2005; Puy, 2007; Wang *et al.*, 2010).

A exemplo do exposto refira-se que, de acordo com SAMARIS (*op. cit.*), na composição mineralógica das escórias de aciaria de FAE processadas são identificadas normalmente espécies mineralógicas como a wustite (FeO), a larnite (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) e a ferrite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Já Masuero (2001 *in* Araujo, 2008) identificou os seguintes principais constituintes mineralógicos: a wustite; o silicato de magnésio (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>); o quartzo; a magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>); e a ferrite de magnésio (MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Graffitti (2002), também para o mesmo tipo de material, mas submetido a diferentes períodos de arrefecimento (1, 4, 6 e 8 meses), identificou a presença de kirschsteinite (CaFeSiO<sub>4</sub>), de gehlenite (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>), de akermanite (Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), de monticelite (Ca<sub>2</sub>MgSiO<sub>4</sub>), de merwinite (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>), de quartzo, de wustite, de periclase (MgO) e de calcite. Ferreira (2010), por seu turno, com base na análise mineralógica realizada por DRX e complementada por observação em microscópio eletrónico de varrimento, sobre amostras de ASIC da SN do Seixal com 6 meses de maturação, identificou a presença de wustite, de silicato de cálcio (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>) e de gehlenite. No caso do ASIC da SN da Maia foi identificada a presença de wustite, de hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de kirschsteinite e de akermanite.

Na tabela 2.37 apresentam-se outros resultados que complementam os já apresentados e que confirmam a heterogeneidade mineralógica das escórias de aciaria de FAE processadas. Outros resultados podem ainda ser consultados em Masuero *et al.* (2000), Puy (2007), Luxán *et al.* (2000, Polese *et al.*, 2006 *in* Araújo, 2008), Tsakiridis *et al.* (2008), Sofilic *et al.* (2010), Ducman e Mladenovic (2011) e Abu-Eishah *et al.* (2012).

**Tabela 2.37** Composição mineralógica de amostras de escórias de aciaria de FAE processadas avaliada com recurso à técnica de DRX

	Mineral	De Lima (1999)		Polisseni (2005)			Araujo (2008)
		E.1	E.2	E1	E2	E3	E
Silicatos cálcicos anídricos	<i>Larnite</i>	PRT	PRT	A	A	A	A
	<i>Belite</i> ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ )	A	A	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	A
	<i>Silicato tricálcico</i> ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ )	A	PRT	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	A
	<i>Gehlenite</i>	PRT	A	A	A	A	PRT
	<i>Ingersonite</i> ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ )	A	PRT	A	A	A	A
	<i>Merwinite</i> ( $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ )	PRT	PRT	A	A	A	A
	<i>Diópsido</i> ( $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SiO}_3)_2$ )	S	S	A	A	A	A
	<i>Melitite</i> ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ )	A	A	PRT <sup>(2)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	PRT
Compostos de ferro	<i>Kirschsteinite</i>	A	A	A	A	A	PRT
	<i>Wustite</i>	PRT	PRT	PRT <sup>(2)</sup>	PRS	PRS	PRT
	<i>Ferrite</i>	A	A	PRT <sup>(2)</sup>	PRT <sup>(2)</sup>	PRT <sup>(2)</sup>	
	<i>Magnetite</i>	A	PRT	A	A	A	PRT
Compostos de cálcio	<i>Hematite</i>	A	A	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(2)</sup>	PRT
	<i>Portlandite</i> ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	PRT	PRT	TR	TR	PRT <sup>(3)</sup>	A
Outros compostos	<i>Calcite</i>	A	PRV	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(2)</sup>	PRT <sup>(3)</sup>	PRT
	<i>Periclase</i>	PRV	PRT				A
	<i>Quartzo</i>	A	PRT	A	PRT <sup>(3)</sup>	PRT <sup>(1)</sup>	PRT
	<i>Brownmillerite</i> ( $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$ )	PRT	A	A	A	A	A
	<i>Etringite</i> ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}$ )	A	PRT	A	A	A	A
	<i>Iowaite</i> ( $\text{Mg}_4\text{Fe}(\text{OH})_8\text{OCl}_{2-4}\text{H}_2\text{O}$ )	A	S	A	A	A	A
	<i>Magnesiohornblende</i> ( $(\text{Ca,Na})_{2-26}(\text{Mg,Fe,Al})_5, 15(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ )	S	S	A	A	A	A

Legenda: (E.1) escória de granulometria 0 mm - 5 mm; (E.2) escória de granulometria 100 mm - 150 mm; (E1) escória a maturar à 72 h; (E2) escória a maturar à 6 meses; (E3) escória a maturar à 24 meses; (E) escória; (PRT) detetado; (A) não detetado; (PRV) detetado em pequenas quantidades; S - o composto mineralógico detetado pode-se confundir com outros compostos de estrutura similar; (PRT<sup>(1)</sup>) - muito frequente; (PRT<sup>(2)</sup>) frequente; (PRT<sup>(3)</sup>) pouco frequente; (TR) traços

#### 2.4.2.5.3 - Caracterização geométrica, física e mecânica

A escória de aciaria de FAE processada é considerada, de um modo geral, um material duro, denso e limpo (SAMARIS, 2004; NSA, 2009a e 2009b), de tonalidade escura (negra), textura vesicular, aspeto áspero (Masuero, 2001 *in* Rohde, 2002; Abu-Eishah *et al.*, 2012), e formato cúbico (NSA, *op. cit.a* e *op. cit.b*; Pasetto e Baldo, 2010). No caso particular da textura, refere-se o estudo desenvolvido por De Lima (1999) que ao ensaiar algumas amostras de escórias de aciaria de FAE processadas em diversas siderurgias espanholas concluiu sobre a existência de três superfícies distintas a olho nu: superfície cavernosa, 43%, superfície áspera, 17%, e superfície áspera e cavernosa, 40%.

Do ponto de vista físico, as escórias de aciaria de FAE processadas apresentam uma massa volúmica superior à dos agregados naturais, entre 3,2 Mg/m<sup>3</sup> e 3,9 Mg/m<sup>3</sup>, devido sobretudo à presença de partículas de ferro na sua constituição em quantidades significativas, e uma capacidade de absorção de água baixa, com valores compreendidos entre 1% e 2% para a sua fração grossa e na ordem dos 4% para a sua fração fina (SAMARIS, *op. cit.*). São ainda consideradas um material que apresenta uma estrutura porosa, com valores de porosidade próximos dos 6%, segundo os resultados obtidos por Wu *et al.* (2007). Os valores desta propriedade podem, contudo, variar em função do método utilizado para o arrefecimento das escórias durante o período da sua maturação e

da velocidade com que o arrefecimento se processa. As escórias de aciaria de FAE, após vazadas, sofrem um rápido arrefecimento desde 1300°C até à temperatura ambiente (Preston, 1991 e Jones *et al.*, 1998 in Pasetto e Baldo, 2010), sendo que a presença de bolhas de ar no interior da escória líquida poderá dar origem a uma micro-porosidade após o seu arrefecimento (Pasetto e Baldo, *op. cit.*). Um arrefecimento realizado através da utilização de água origina uma escória com porosidade elevada e com resistência à fragmentação baixa quando comparado com uma escória arrefecida a ar (SAMARIS, 2004).

Note-se que também a massa volúmica e o tamanho das partículas das escórias de aciaria de FAE processadas são influenciadas, neste caso, quer pelo método adotado para produzir, no qual se engloba o tipo de forno utilizado, o tipo de processamento utilizado e os métodos e estratégias utilizadas durante o período de armazenamento das escórias (Rohde, 2002; SAMARIS, *op. cit.*), quer pela sua composição química e mineralógica (SAMARIS, *op. cit.*).

Do ponto de vista mecânico, as escórias de aciarias de FAE processadas apresentam uma resistência ao desgaste elevada devido ao seu formato cúbico e superfície áspera (NSA, 2009a), e uma resistência à fragmentação elevada com o coeficiente de *Los Angeles* a variar normalmente entre 15% e 50% (SAMARIS, *op. cit.*). Em relação a esta última propriedade, Rohde (*op. cit.*) cita alguns autores, como Mathur *et al.* (1999), Lima *et al.* (2000), Silva *et al.* (2000) e Alvarenga *et al.* (2001), que referem que as perdas por fragmentação são sempre inferiores a 25%, e que o comportamento das escórias de aciaria durante os ensaios de *Los Angeles* depende da sua composição química e do método de maturação a que foram submetidas.

Ferreira (2010) procedeu à caracterização geométrica, física e mecânica das escórias de aciaria de FAE processadas na SN do Seixal e da Maia, tendo em vista a avaliação da viabilidade técnica da sua reciclagem em aterros e em camadas de pavimentos rodoviários. Os resultados obtidos por este autor e que se apresentam na tabela 2.38 enquadram-se no já exposto na presente secção, nomeadamente, no que respeita à massa volúmica, à capacidade de absorção de água e à resistência à fragmentação.

Outros autores como De Lima (1999), Rohde (*op. cit.*), Polisseni (2005), Pasetto e Baldo (*op. cit.*), Sofilic *et al.* (2010), Ducman e Mladenovic (2011), Abu-Eishah *et al.* (2012), Liapis e Likoydis (2012) e Sorlini *et al.* (2012) realizaram estudos onde avaliaram algumas das propriedades estudadas por Ferreira (*op. cit.*). Os resultados obtidos pelos autores mencionados são, na sua generalidade, da mesma ordem de grandeza dos apresentados na tabela 2.38.

**Tabela 2.38** Comparação entre as propriedades de amostras de ASIC e de granito

Prop.	Parâmetro		Ferreira (2010)		
			ASIC		Granito
			(SN do Seixal)	(SN da Maia)	
Geométricas	Granulometria	D <sub>max</sub> (mm)	38,1	76,1	38,5
		Cu	33,2	9,64	63,3
		Cc	4,3	1,95	2,8
		Finos (<0,074 mm) (%)	6,5	1,5	7,6
	Índice de achatamento (%)		5	10	≤20
Físicas	Índice de forma (%)		6	7	≤20
	Massa volúmica (Mg/m <sup>3</sup> )	Material impermeável	3,31	3,45	2,68
		Partículas saturadas	3,05	3,25	2,62
		Partículas secas	2,94	3,17	2,59
	Absorção de água (%)		3,87	2,59	1,2
	Densidade das partículas		3,07	3,26	2,65
	Equivalente de areia (%)		80	100	40
	Valor de azul de metileno (%) (a)		0	0	2
Mecânicas	Degradabilidade		-	1,01	-
	Esmagamento (%)		-	22,9	-
	Fragmentabilidade		-	1,18	-
	Los Angeles (%)		23	28	≤40
	Micro-Deval (%)		11	11	≤20
	Resistência à carga pontual (MPa)		-	2,47	-
	Proctor modificado	Massa volúmica seca máxima (Mg/m <sup>3</sup> )	2,32	2,43	2,12
		Teor em água (%)	5,0	3,45	6,0
	Índice de suporte Californiano(b)	Imediato (%)	100	72	79
		Embebido (%)	51	48	-
		Expansibilidade (%)	0	0	-

Legenda: Índice de Suporte Californiano (cf. *California Bearing Ration* - CBR); (a) valor expresso em g de azul por 100 g de material; (b) corresponde a compactação pesada

Da consulta das restantes fontes bibliográficas resultam referências a outras propriedades das escórias de aciaria de FAE processadas, como é o caso do ângulo de atrito interno, cujos valores variam entre 40° e 45°, o que contribui para uma estabilidade elevada do meio particulado (SAMARIS, 2004). No mesmo relatório é ainda mencionado que as referidas escórias possuem um índice de CBR elevado, normalmente acima dos 300%. Já Silva (1994, Lima *et al.*, 2000 e Chesner *et al.*, 2001 in Rohde, 2002) apontam para valores normalmente superiores a 100%.

Para além das propriedades já tratadas, há ainda a referir, a expansibilidade volumétrica (SAMARIS, *op. cit.*; Ferreira, 2010; Wang *et al.*, 2010), que pode ser minimizada mediante a redução da quantidade da fração fina da escória, a sua maturação com rega de água natural por um determinado período de tempo, ou o seu tratamento com ácido (OCDE, 1997 in SAMARIS, *op. cit.*). O tempo de maturação pode oscilar entre três meses e um ano dependendo do conteúdo de cal livre na escória (Rubio e Carretero, 1991 in Geyer, 2001; Rohde, *op. cit.*), da granulometria da escória, da altura da pilha de escórias armazenadas e das condições climáticas (Geyer, *op. cit.*). Refira-se, contudo, que mesmo quando a escória é sujeita a uma maturação controlada, pode continuar a apresentar uma expansibilidade residual, normalmente inferior a 3% (Ferreira, *op. cit.*).

A expansibilidade das escórias de aciaria de FAE deve-se, essencialmente, à presença de cal e/ou de MgO na forma livre, que ao reagirem com água, hidratam (Rohde, *op. cit.*; OCDE, 1997 in SAMARIS, *op. cit.*; Wang *et al.*, *op. cit.*), e formam compostos volumetricamente estáveis, respetivamente, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e o hidróxido de magnésio (Mg(OH)<sub>2</sub>) (Motz e

Geiseler, 2001; Viklund-White e Ye *in* Graffitti, 2002; Ferreira, 2010; Wang *et al.*, 2010). A hidratação da cal livre pode ocorrer em poucas semanas e conduz a um aumento de volume de cerca de 100% em relação ao seu volume inicial e a um aumento da sua superfície em cerca de 54%. Na hidratação do MgO livre, além desta ser mais lenta que a da cal dado poder ocorrer por muitos anos, o volume pode aumentar em cerca de 120% (Weast, 1971 e Cincotto, 1977 *in* Machado, 2000). Com este aumento, que segundo Rohde (2002) pode ser até 14% do volume inicial da escória, pode ocorrer a perda de coesão e a consequente desintegração da escória em fragmentos (Machado, *op. cit.*; Motz e Geiseler, 2001; Graffitti, *op. cit.*; Wu *et al.*, 2007; Akinmusuru, 1991 e Xue *et al.*, 2006 *in* Pasetto e Baldo, 2010).

A presença de partículas de aço e/ou de ferro metálico, pode ser outra das causas da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria de FAE em consequência da corrosão ou da oxidação dessas partículas (Burgos *et al.*, 1999 *in* Machado, *op. cit.*; Heaton, 1989 e Rubio e Carretero, 1991 *in* Polisseni, 2005; Ferreira, *op. cit.*). Neste caso, pode ocorrer um aumento de volume em relação ao Fe entre 77% e 329% (Weast, 1971 *in* Machado, *op. cit.*).

A expansibilidade é frequentemente citada como uma propriedade limitativa para a utilização das escórias de aciaria de FAE processadas como material de construção (Graffitti, *op. cit.*; Polisseni, *op. cit.*; Huang *et al.*, 2007), em particular quando utilizadas para a pavimentação rodoviária (Machado, *op. cit.*; Ferreira, *op. cit.*). Esta propriedade é tratada com maior detalhe por Machado (*op. cit.*), Motz e Geiseler (*op. cit.*), Geyer (2001), Rohde (*op. cit.*), Polisseni (*op. cit.*), Puy (2007) e Wang *et al.* (*op. cit.*).

#### **2.4.2.6 - Valorização das escórias de aciaria de FAE processadas na construção**

Num passado recente, a valorização das escórias de aciaria de FAE como agregado reciclado era encarada com algumas reservas, sendo considerada pouco atrativa sob o ponto de vista económico face à maior quantidade de escórias de CO produzidas (Sofilic *et al.*, 2010). Também os condicionalismos inerentes à produção de aço, com consequências na composição final das escórias de aciaria de FAE criaram um clima de desconfiança quanto à possibilidade destas virem a ser reutilizadas ou recicladas com benefícios práticos (Bregant, 1995 *in* Pasetto e Baldo, *op. cit.*). Por estes motivos, as escórias de aciaria de FAE processamento mantinham-se armazenadas em depósitos a céu aberto, sendo posteriormente encaminhadas para aterro (Graffitti, *op. cit.*).

A tomada de consciência sobre problemas ambientais aliada à introdução de novos conceitos na sociedade, como o desenvolvimento sustentável, e à maior utilização de FAE nas indústrias siderúrgicas, levaram ao desenvolvimento de novos estudos com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da utilização das escórias de aciaria de FAE processadas como agregado reciclado em diversas áreas de aplicação (Sofilic *et al.*, *op. cit.*). A Alemanha, a Espanha, os EUA, o Japão e a Suécia, entre outros, foram dos primeiros países a realizar tais estudos (Graffitti, *op. cit.*).

Recentemente, um estudo estatístico realizado pela *EUROpean SLAG association* - EUOSLAG para o ano de 2008 (EUOSLAG, 2008), veio comprovar a atual tendência para a



utilização de agregados reciclados resultantes do processamento de escórias de aciaria de FAE em detrimento de agregados naturais. Segundo este, 79% das escórias de aciaria processadas em território europeu foram valorizadas, 15% armazenadas temporariamente por razões económicas e apenas 6% enviadas para aterro. Já de acordo com dados fornecidos pela FHWA (2000), e publicados em SAMARIS (2004), em países como a Alemanha, a Dinamarca, a Suécia e os Países Baixos, as taxas de reciclagem variam entre 90% e 100%.

#### **2.4.2.6.1 - Sistemas de drenagem**

Na bibliografia consultada não foram identificados estudos com vista à avaliação da viabilidade técnica da valorização de agregados reciclados resultantes do processamento de escórias de aciaria de FAE em camadas de drenagem do sistema de proteção basal ativo e/ou do sistema de selagem final de aterros de resíduos. No entanto, importa salientar alguns realizados estudos no âmbito dos pavimentos rodoviários, como os desenvolvidos por Kneller *et al.* (1994), Gupta *et al.* (1994) e Hurd (1998), que alertam para a possível formação de tufa (uma forma de carbonato de cálcio precipitado) e consequente obstrução dos sistemas de drenagem, podendo, deste modo, que poderá impedir a correta drenagem da estrutura do pavimento e, consequentemente, acelerar a deterioração daquela estrutura, elevando os custos da sua manutenção (Rohde, 2002).

De acordo com Hurd (*op. cit.*), a cal livre presente na composição das escórias de aciaria de FAE é o elemento responsável pela formação de tufa, sendo esta, segundo Graffitti (*op. cit.*), um material “(...) composto de carbonato de cálcio”. Graffitti (*ibid.*) adianta, ainda, que as escórias de aciaria de FAE que apresentem concentrações de cal livre superiores a 1% têm potencial para a formação de tufa. A deposição desta é particularmente incrementada para temperaturas elevadas, pelo que o seu estudo é muito relevante na avaliação da viabilidade técnica da aplicação das escórias de aciaria de FAE processadas na camada de drenagem e recolha dos lixiviados, atendendo a que nos aterros de resíduos se podem atingir temperaturas elevadas.

A possível ocorrência deste fenómeno no caso das escórias de aciaria de FAE serem valorizadas na camada de drenagem do sistema de proteção basal ativo e/ou do sistema de selagem final de aterros de resíduos será avaliada noutro estudo a desenvolver no âmbito de uma outra dissertação que complementarà a presente, conforme foi referido na secção 1.1.

#### **2.4.2.6.2 - Outras aplicações**

Como agregado reciclado, as escórias de aciaria de FAE processadas podem ser utilizadas na construção de aterros estruturais e de pavimentos, quer nas camadas não ligadas, quer nas misturas asfálticas (ALT-MAT, 2001; Machado, 2002; SAMARIS, *op. cit.*; Huang *et al.*, 2007; UBA, 2008; NSA, 2009b; Roque, 2011c), bem como na produção de cimento (*Decreto* 34/2003; UBA, *op. cit.*; Ferreira, 2010) e de betão (*Decreto* 34/2003; Polisseni, 2005), na estabilização de solos e como fertilizante (Piret e Dralants, 1984 *in* Machado, *op. cit.*).

Nos pavimentos rodoviários, os agregados reciclados resultantes do processamento de escórias de aciaria de FAE são particularmente eficientes quando utilizados na camada de base devido à sua angularidade, e à sua durabilidade (Machado, 2002; OCDE, 1977 *in* SAMARIS, 2004) e resistência à abrasão elevadas (SAMARIS, *op. cit.*; Huang *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007; Ellis e Widyatmoko, 1999, Del Fabbro *et al.*, 2001, Bregant, 2007, Fotini, 2009 *in* Pasetto e Baldo, 2010). Estas propriedades conferem às escórias vantagens sobre muitos agregados naturais e garantem uma maior durabilidade ao pavimento (Motz e Geiseler, 2001; Huang *et al.*, *op. cit.*; Pasetto e Baldo, *op. cit.*). Porém, as escórias devem ser corretamente caracterizadas, mediante a execução de ensaios realizados correntemente para o estudo das propriedades dos agregados naturais comumente utilizados na pavimentação (SAMARIS, *op. cit.*), e assegurada a sua estabilidade volumétrica (Motz e Geiseler, *op. cit.*; Cerja-Stefanovic *et al.*, 1997 *in* Rohde, 2002; Albernaz *et al.* 2000 *in* Polisseni, 2005). As escórias que apresentem valores de expansibilidade superiores aos permitidos pelas regulamentações que especificam os requisitos mínimos da aplicação em camadas estruturais de pavimentos rodoviários podem ser utilizadas na construção de parques de estacionamento não pavimentados e em bermas (NSA, 2009a).

As escórias de aciaria de FAE processadas podem ainda ser utilizadas no leito de pavimento, na sub-base e na base granular dos pavimentos flexíveis (Pasetto e Baldo, *op. cit.*). Nesta última, contribui para um aumento do atrito interno e, consequentemente, maior estabilidade mecânica da mistura betuminosa (*ibid.*). Outra forma de reciclagem é como agregado para balastro ferroviário (Rohde, *op. cit.*; Ferreira, 2010; Roque, 2011c).

Num estudo desenvolvido por Motz e Geiseler (*op. cit.*), no qual procederam à avaliação da estabilidade volumétrica e do comportamento ambiental das escórias de aciaria de FAE processadas, os resultados por estes obtidos validaram a utilização deste tipo de escória como material de construção, em particular na construção de bases e sub-bases, com a obtenção de idêntico desempenho ao apresentado durante a utilização de agregados de origem basáltica. Da bibliografia consultada existem outros estudos que validam igualmente a utilização das escórias de aciaria de FAE processadas na construção de pavimentos, como é o caso dos desenvolvidos por: Garcia *et al.* (1999 *in* Graffiti, 2002); Rohde (*op. cit.*); Bagampadde *et al.* (1998 e Khan and Wahhab, 1998 *in* Huang *et al.*, *op. cit.*); Parente *et al.* (2003 *in* Ferreira, *op. cit.*); Ferreira (*op. cit.*); Pasetto e Baldo (*op. cit.*); Gomes Correia *et al.* (2012) e Liapis e Likoydis (2012). No caso particular de Ferreira (*op. cit.*), este concluiu que o ASIC apresenta características ambientais, químicas, mineralógicas, geométricas, físicas e mecânicas que permite classifica-lo como material inerte e de desempenho mecânico elevado, podendo os resultados obtidos viabilizar a sua utilização em obras de grandes empresas de construção e a sua aceitação por parte de entidades como as Estradas de Portugal - EP, e a REde FERroviária Nacional - REFER.

Outras possíveis aplicações para as escórias de aciaria de FAE processadas são na produção de cimento (Tsakiridis *et al.*, 2008 *in* Wang *et al.*, 2010) e de cimento alternativo, este uma mistura de escória de aciaria de FAE com escória de AF e gipsite (Montgomery e Wang, 1991 *in* Machado, 2000), como clínquer (Sersale, 1986 *in* Machado, *op. cit.*) ou como matéria-prima para a produção de betão, em detrimento dos agregados naturais, promovendo desta forma uma melhoria significativa

nas propriedades mecânicas do betão (Geyer, 2001), nomeadamente em termos de durabilidade e resistência à compressão e à tração (Maslehuddin *et al.*, 2003).

No que respeita à produção de cimento e como matéria-prima para a produção de betão, na bibliografia consultada existem diversos estudos que validam a utilização de agregados reciclados resultantes do processamento de escórias de aciaria de FAE para essas aplicações, como é o caso dos desenvolvidos por De Lima (1999), Geyer (*op. cit.*), Abreu *et al.* (1998, Garcia *et al.*, 1999 e Moraes *et al.*, 2000 in Graffitti, 2002), Maslehuddin *et al.* (*op. cit.*), Asi *et al.* (2007 in Wu *et al.*, 2011) e Abu-Eishah *et al.* (2012).

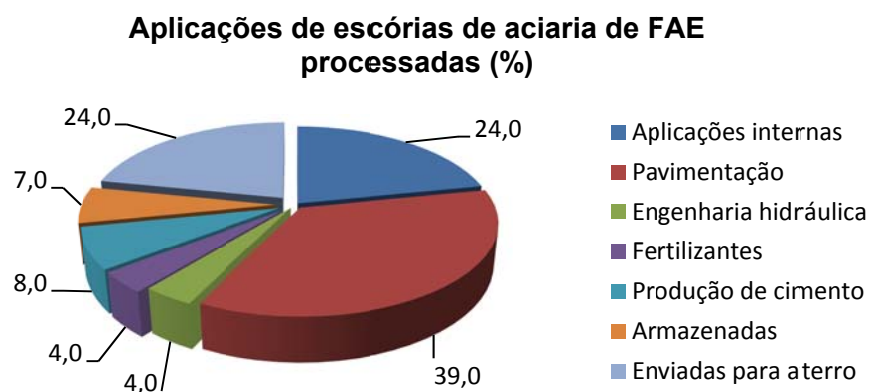
Como clínquer, as escórias de aciaria de FAE processadas contribuem para uma diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> (Machado, 2000; SAMARIS, 2004), e uma redução do consumo de energia (Geiseler, 1996 in Rohde, 2002) e de matérias-primas naturais (Rohde, *op. cit.*). Porém, a enorme variabilidade da sua composição química aliada ao baixo controlo de qualidade das mesmas, dificulta a sua total aceitação para esta aplicação (Machado, *op. cit.*).

As escórias de aciaria de FAE processadas podem também ser utilizadas para a estabilização de solos (*ibid.*), permitindo o aumento da resistência destes, uma vez que possuem uma rugosidade superficial elevada, um excelente índice de forma e uma angulosidade e resistência ao desgaste elevada (López *et al.*, 1989 in Machado, *op. cit.*). Por apresentarem concentrações elevadas de CaO e de óxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), podem ser utilizadas como fertilizante ou como aditivo no cultivo de plantas (López *et al.*, 1989 in Machado, *op. cit.*), ou ainda na modificação do pH dos solos, como substituto do calcário (NSA, 2009c). Além disso, contribuem com outros elementos para os solos, como o Fe, o Mn, o Mg e o Zn (*ibid.*). Segundo a mesma entidade, podem ainda ser úteis no tratamento de águas residuais, nomeadamente na remoção de metais pesados, como o Cu e o Pb, ou para a remoção de fosfato, conforme concluído do estudo apresentado por Barca *et al.* (2012).

Nas siderurgias, parte das escórias de aciaria de FAE processadas são reutilizadas no processo de produção do aço (SAMARIS, *op. cit.*), desempenhando o papel de fundente e de protetor do revestimento refratário dos FAE (Von Krüger, 1995 in Rohde, *op. cit.*). No Japão, tal aplicação mostrou-se vantajosa ao verificar-se um aumento de 14% na eficiência da desfosforação, um decréscimo de 54% no consumo de cal e uma diminuição de 9% na quantidade de escória branca produzida (Sugihara *et al.*, 2000 in Graffitti, *op. cit.*).

De acordo com Ferreira (2010), aproximadamente 4% das escórias de aciaria de FAE processadas são empregues na engenharia hidráulica (figura 2.19), nomeadamente para combater a erosão das áreas costeiras.

Na figura 2.19 apresentam-se as taxas inerentes a algumas das aplicações conhecidas para as escórias de aciaria de FAE processadas na Europa.



**Figura 2.19** Taxa de utilização das escórias de aciaria de FAE processadas em diversas áreas de aplicação na Europa (adaptado de SAMARIS, 2004)

## 2.5 - Durabilidade dos materiais

### 2.5.1 - Considerações gerais

A utilização de materiais rochosos como agregados naturais em obras de engenharia civil é uma prática corrente desde os princípios da nossa civilização (Maia, 2001). Contudo, cedo se sentiu a necessidade de fundamentar essa utilização com base em avaliações teóricas e práticas. A observação da evolução das características dos materiais rochosos ao longo do tempo em resposta à sua exposição aos agentes externos constituiu o primeiro passo para o atual conhecimento sobre a sua aplicação e o seu comportamento em obras de engenharia civil.

As primeiras considerações sobre a alteração de materiais rochosos e consequentes implicações no comportamento das obras datam do início do século XIX, tendo sido expostas por J. Fournet, em França (Pedro, 1969 *in* Maia, *op. cit.*). Na engenharia civil e áreas afins, a alteração de materiais rochosos por influência de agentes químicos, físicos e biológicos só foi abordada de forma sistemática nas últimas décadas (Farjallat 1972 *in* Maia, *op. cit.*). Até então, a avaliação da qualidade destes materiais como agregados naturais para a construção resultava apenas da sensibilidade e da experiência adquirida pelos projetistas e construtores (Maia, *op. cit.*).

Atualmente, a utilização e o comportamento dos agregados naturais em obras de engenharia civil encontram-se extensamente estudados e documentados, em contraposto ao verificado em relação aos agregados reciclados, que só recentemente começaram a ser valorizados como materiais de construção. Atendendo, porém, ao facto da sua reciclagem ser uma exigência prevista pelos sistemas de gestão de resíduos atuais e se traduzir em benefícios económicos e ambientais significativos, comparativamente à utilização de agregados naturais, é clara a necessidade de se enveredar por uma contínua investigação no âmbito da caracterização laboratorial dos agregados reciclados e da avaliação do seu comportamento em obra, a curto, a médio e a longo prazo.

Assumindo a importância do exposto no parágrafo anterior e tendo em consideração os propósitos deste estudo, que passam por avaliar a suscetibilidade à degradação de dois agregados

reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, com vista à sua utilização em estruturas de drenagem de infraestruturas de transporte e de obras geotécnicas, e muito particularmente na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de proteção basal dos aterros de resíduos, na presente secção são abordados temas como a alteração e a durabilidade dos materiais e os métodos utilizados para a avaliação desta última. Contudo, dado que na bibliografia consultada não foram encontrados estudos que envolvessem a realização de ensaios de DMA para avaliação da durabilidade dos agregados reciclados, em geral, e dos resultantes do processamento dos RCD e das escórias de aciaria de FAE em particular, apenas se apresentam os estudos realizados com os agregados naturais ensaiados neste estudo, ou seja o basalto e o calcário. Como exposto na secção 1.2, estes materiais foram selecionados com o objetivo de servirem de referência aos resultados obtidos no programa experimental com o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC.

A exceção no que respeita à avaliação da durabilidade dos agregados reciclados diz respeito ao estudo realizado por Rohde (2002), além dos dados já apresentados nas secções 2.4.1.5.3 e 2.4.2.5.3 relativos ao coeficiente de *Los Angeles* dos RCD e das escórias de aciaria de FAE, respetivamente. Com o objetivo de avaliar a resistência das escórias de aciaria de FAE processadas às alterações resultantes de intempéries, Rohde (*ibid.*) procedeu à realização de ensaios de durabilidade, que envolveram a imersão de amostras de escórias numa solução de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), e posterior secagem em estufa. Do ensaio realizado obteve perdas de massa inferiores a 1%, não sendo visível qualquer alteração significativa no material ensaiado.

Posto isto, inicialmente, na secção 2.5.2, apresentam-se as definições de alguns termos relacionados com a alteração e a durabilidade, tais como: a “alteração”, a “alterabilidade”, a desintegração, a “decomposição”, a “desagregação”, a “degradação” e a “meteorização” com vista à clarificação de alguns conceitos. Na secção 2.5.3 expõem-se algumas noções sobre a alteração das rochas, seguindo-se a apresentação dos principais mecanismos de alteração física e química conhecidos, ainda que nem todos sejam simulados no ensaio de DMA realizado neste estudo para avaliar a durabilidade dos materiais. Os efeitos desses mecanismos sobre os materiais rochosos são descritos na secção 2.5.4.

A alteração influencia de forma irreversível o comportamento mecânico dos materiais rochosos em obra, pelo que na secção 2.5.5 são feitas algumas considerações sobre o seu efeito na durabilidade das rochas.

Na secção 2.5.6 apresentam-se os principais métodos utilizados para a avaliação da durabilidade dos materiais rochosos, entre os quais se destaca o ensaio de DMA, tendo em consideração o programa experimental efetuado no presente estudo.

Por último, na secção 2.5.7 descrevem-se alguns casos de estudos de avaliação da suscetibilidade à degradação de basaltos e calcários, uma vez que em relação aos agregados reciclados selecionados não foi encontrada informação relevante nas várias fontes bibliográficas consultadas, como já mencionado.

## 2.5.2 - Algumas definições

Na bibliografia existem diversos termos que, de uma forma ou de outra, se referem às modificações dos materiais rochosos em resposta às ações dos agentes da geodinâmica externa. Como exemplo, mencionam-se os casos da “meteorização”, da “alteração”, da “alterabilidade”, da desintegração, da “decomposição”, da “desagregação”, da “degradação” e da “durabilidade”.

O termo “meteorização”, terminologia derivada da anglo-saxónica “*weathering*” (Duarte, 2002), é definido Laboratório Nacional de Energia e Geologia - LNEG (2012) como sendo uma forma de desintegração natural das rochas e dos solos em resultado da exposição destes na superfície terrestre a agentes da atmosfera, da hidrosfera e da biosfera. Esta definição considera períodos de tempo equivalente a milhões de anos em resultado da lentidão com que ocorrem as transformações nos materiais rochosos, pelo que para a geotecnia interessa adotar uma abordagem segundo uma ótica diferente, dado que os períodos de tempo interessados são os da vida das obras de engenharia, das dezenas de anos.

Em Geologia de Engenharia, o termo “meteorização” pode ser entendido, de um modo geral, como a degradação das propriedades físicas (desintegração) e da composição química (decomposição) das rochas e dos seus minerais constituintes em resposta à ação dos agentes de alteração (físicos, químicos e biológicos) (Gomes, *op. cit.*; Leinz e Mendez, 1963 *in* Maia, 2001; Viterbo *et al.*, 2007; Selby 1993 *in* Ceryan, 2008).

Maia (*op. cit.*) refere que o termo “alteração” é igualmente utilizado para designar as modificações físicas e químicas das rochas, com estas a darem origem a alterações no desempenho da rocha do ponto de vista geomecânico. Já Miranda (1986 *in* Duarte, *op. cit.*) distinguem os termos “meteorização” e “alteração” referindo-se ao primeiro como sendo um tipo particular de alteração visando relacionar o fenómeno de alteração como agentes externos de natureza meteórica. Simão (2003) associa o termo “alteração” à transformação, à decomposição e à degradação de uma rocha mediante a ação de agentes físicos e químicos, com esta a transformar-se num outro produto, em equilíbrio com o meio envolvente.

O LNEG (*op. cit.*), por seu lado, distingue o termo “alteração” em “alteração deutérica” e “alteração hidrotermal”.

A alteração deutérica “ocorre nos minerais magmáticos podendo ocorrer também nas rochas encaixantes e encontra-se associada aos últimos estádios de consolidação e arrefecimento de um corpo magmático”. A água deutérica é um dos principais agentes neste fenómeno e promove alterações como a hidratação e a oxidação dos minerais.

A alteração hidrotermal ocorre nos minerais e nas rochas por intermédio da ação de águas hidrotermais e está frequentemente associada a fenómenos ígneos. A água quente e sob pressão leva à hidratação e/ou lixiviação das frações sólidas dos minerais ou das rochas ocorrendo posteriormente o transporte de elementos químicos “(...) que, ao serem depositados, podem passar a constituir concentrações minerais com interesse económico (jazidas minerais)”.

O “grau de alteração” ou “estado de alteração da rocha” são expressões utilizadas para qualificar as diferentes intensidades com que ocorrem as alterações nas rochas (Maia, *op. cit.*).

Simão (2003) refere-se ao primeiro com o “conjunto de propriedades de natureza mineralógica, física, química e geotécnica que caracterizam a rocha em determinada etapa de evolução do processo (...)” de alteração.

A maior ou menor suscetibilidade da rocha à alteração é definida pelo termo “alterabilidade” (Aires-Barros, 1971 e Fookes *et al.*, 1988 *in* Gomes, 2001; Simão, *op. cit.*), sendo tal aptidão função da estabilidade química dos minerais que constituem o material rochoso (Maia, 2001). Pinho (2003) define “alterabilidade” como um conceito dinâmico, referindo-se a esta como a aptidão de uma rocha se alterar ao longo do tempo, enquanto que Hamrol (1962 *in* Gomes, *op. cit.*) refere que “(...) uma rocha é dita com maior alterabilidade que outra, se ambas tendo sido submetidas aos mesmos agentes externos durante o mesmo tempo, o grau de alteração é mais avançado no caso da primeira”. O tempo é equiparado ao da escala humana, ou seja, “(...) os fenómenos ocorrem concomitantemente com o uso da rocha, à escala do homem e das suas obras de engenharia” (Silva, 2007). Simão (*op. cit.*) alerta para a importância da “alterabilidade” quando se pretende qualificar um material rochoso para a sua aplicação futura, dado afetar diretamente a sua durabilidade como agregado natural.

A “desintegração” consiste na perda de coesão da rocha pela sua fraturação e progressiva individualização dos seus minerais constituintes, em resultado de agentes físicos, mas sem que se dê uma modificação da natureza dos mesmos (Jeremias, 1991; Maia, *op. cit.*). Já a “decomposição” engloba processos de alteração química devido à presença de água, os quais envolvem inúmeras reações químicas, tais como: a carbonatação; a oxidação; a dissolução; a hidratação; e a hidrólise (Pinho, *op. cit.*), que proporcionam uma modificação progressiva da natureza dos minerais, mas sem que se dê necessariamente a sua desintegração (Maia, *op. cit.*). Em resultado, ocorre a formação de novas espécies minerais com características químicas, físicas e mineralógicas diferentes das dos minerais iniciais (Jeremias, *op. cit.*).

A “desagregação”, em contraposto aos dois fenómenos anteriormente abordados, pode ter origem em processos físicos e/ou químicos, traduzindo-se numa redução da resistência mecânica da rocha e num aumento da produção de finos (Maia, *op. cit.*). O termo “degradação”, em geologia de engenharia, é entendido como a diminuição progressiva da qualidade dos materiais rochosos devido a processos físicos e químicos, sendo esta acompanhada pela diminuição da sua resistência mecânica (West *et al.*, 1970 *in* Gomes, *op. cit.*).

Por último, no que concerne à “durabilidade”, segundo a *American Society for Testing Materials* - ASTM (2001 *in* Silva, *op. cit.*), esta é definida como a capacidade da rocha em manter intactas as características essenciais, tais como a estabilidade ou a resistência à degradação, ao longo do tempo e sob a ação de agentes físicos, químicos e/ou mecânicos. Considerada por Monte (1991 *in* Simão, *op. cit.*), como a característica mais importante a estudar quando se pretende a utilização do material rochoso como agregado natural, a “durabilidade” é baseada no período de tempo em que a rocha pode manter as suas características intactas durante a sua utilização.

Na bibliografia consultada, os termos “meteorização” e “alteração” são frequentemente utilizados com o mesmo propósito. Com o efeito, na presente dissertação será utilizado o termo “alteração”.

### 2.5.3 - Algumas noções sobre a alteração das rochas

Durante o ciclo das rochas, estas são trazidas até às proximidades da superfície terrestre por intermédio de ações de grande carga energética, como sejam, as resultantes do vulcanismo ou dos movimentos na crosta terrestre, ficando sujeitas a ações de agentes externos que diferem das existentes aquando da sua formação (Jeremias, 1991). As rochas atingem o ponto de equilíbrio em relação às condições prevalecentes no meio onde passam a estar inseridas depois de sujeitas a um conjunto de modificações que interferem com as suas características físicas e/ou químicas (*ibid.*), nomeadamente com a textura, a composição mineralógica, a porosidade, a permeabilidade, a cor e a resistência, entre outros (Duarte, 2002).

Do ponto de vista da engenharia civil e áreas afins, os processos de alteração levam a uma diminuição progressiva da resistência mecânica da rocha, a um aumento da sua deformabilidade, e a modificações na sua permeabilidade, porosidade (Farjallat, 1972 *in* Gomes, 2001) e composição mineralógica (Gupta e Seshagiri Rao, 2000), quer devido à remoção de elementos solúveis constituintes dos seus minerais, quer devido à dissolução dos seus elementos com função de cimentação (Guidicini e Nieble, 1984 *in* Lopes, 2006). A progressiva perda de qualidade da rocha reflete-se no seu desempenho, principalmente do ponto de vista geomecânico (Frazão, 1993 *in* Maia, 2001; Dearman, 1995, Hencher e McNicholl, 1995 e Price, 1995 *in* Moon e Jayawardane, 2004).

Os mecanismos de alteração das rochas e a natureza dos materiais resultantes são função de diversos fatores. Nestes incluem-se os fatores internos à rocha como as composições química e mineralógica, a presença de descontinuidades e de minerais argilosos expansivos, a textura, a estrutura, a granulação e o grau de cimentação, e os fatores externos ou ambientais tais como: a hidrosfera; a precipitação; a temperatura; o pH do meio ambiente; e a atividade biológica; entre outros (Jeremias, *op. cit.*; Pinho, 2003; *Geological Society Engineering Group Working Party Report - GSEGWPR*, 1995 e Hill e Rosenbaum, 1998 *in* Pellegrino e Prestininzi, 2007). O período de tempo de atuação dos mecanismos de alteração é também um fator importante (Jeremias, *op. cit.*; Gomes, *op. cit.*; Pinho, *op. cit.*).

Em geologia de engenharia apenas se devem considerar os mecanismos de alteração física e química que possam levar à modificação das características físicas e mecânicas das rochas num período de tempo que possa influenciar o comportamento das obras (Jeremias, *op. cit.*), razão pela qual os estudos são efetuados para períodos de tempo da ordem das centenas de anos. Nalguns casos específicos, alterações significativas podem ocorrer em intervalos de tempo de apenas alguns anos ou até meses (Maia, *op. cit.*; Gomes, *op. cit.*).

Na tabela 2.39 apresenta-se um resumo dos principais processos de degradação a que as rochas podem estar sujeitas, e os consequentes efeitos. Este foi elaborado por Fookes *et al* (1991) e apresentado por Gomes (*op. cit.*).



**Tabela 2.39** Processo de degradação dos materiais rochosos à escala geológica e à escala de engenharia (adaptado de Gomes, 2001)

Escala do tempo	Processo	Localização	Processo de degradação/etapa de processamento	Efeito no material
<b>Geológica</b>	Geológico	<i>In situ</i>	- Alteração deutérica - Alteração meteórica	Alteração mineralógica, e mudança do volume, da forma, e da textura da rocha, entre outros
<b>Engenharia</b>	Produção	Em processamento	- Seleção - Desmonte - Britagem - Peneiração - Lavagem	Abrasão, impacto, perda de finos, alterações nas propriedades físicas e mecânicas.
		Pilha de armazenamento	- Alteração	Produção de finos, mudança nas propriedades físicas e mecânicas.
	Construção	Local de obra	- Transporte - Mistura - Compactação - Alteração	Abrasão, produção de finos, variação do teor em água
		Depende do tipo de uso	- Alteração - Abrasão - Impacto - Carregamento	Alteração química mínima (o efeito no material depende da sua utilização)

Os mecanismos de alteração das rochas ocorrem de modo gradativo (Maia, 2001), e por intermédio de agentes externos como a água, a temperatura, o pH, o vento e os seres vivos, entre outros, existentes no meio onde estas se encontram inseridas (Duarte, 2002). Embora a atuação destes agentes ocorra em simultâneo no tempo e no espaço, segundo diversas intensidades (*ibid.*), é comum separar-se os mecanismos de natureza física dos de natureza química a fim de uma melhor compreensão dos mesmos (*ibid.*; Delgado Rodrigues, 1996 *in* Silva, 2007).

Os mecanismos de natureza física tendem a ocorrer em zonas mais superficiais, enquanto os mecanismos de natureza química ocorrem em zonas de maior profundidade, da ordem das dezenas a centenas de metros (Chorley, 1969 *in* Duarte, *op. cit.*). A intensidade de ambos os mecanismos depende sobretudo da acessibilidade dos mesmos à rocha ou, em maior escala, ao maciço rochoso (Duarte, *op. cit.*). Em escalas pequenas, o acesso é condicionado pela porosidade e, em escalas maiores, pela fracturação do maciço rochoso (*ibid.*).

### **2.5.3.1 - Mecanismos de alteração física**

Jeremias (1991) refere-se à alteração física como um “(...) processo segundo o qual a rocha se fragmenta em diversas partículas sucessivamente mais pequenas em resultado da energia desenvolvida pelas forças físicas”, ou por outras palavras, mediante a interação com os agentes mecânicos (Maia, *op. cit.*). A desintegração da rocha (outra denominação atribuída à alteração física) pode ocorrer sem que se verifiquem alterações significativas na sua composição química e mineralógica (Lopes, 2006).

Os mecanismos de alteração física assumem especial relevância nas rochas que contêm na sua constituição minerais argilosos (Jeremias, *op. cit.*). Nestes casos, mesmo que se encontrem em concentrações muito reduzidas, tais minerais contribuem para a degradação das propriedades

geotécnicas das rochas e, em certas quantidades, a sua presença é determinante para o comportamento das mesmas (Delgado Rodrigues, 1986).

Os minerais argilosos, devido à sua capacidade para absorverem e adsorverem água, tendem frequentemente a sofrer expansão quando em contacto com aquele tipo de meio aquoso (*ibid.*). Em consequência, conferem às rochas, em maior ou menor grau, a propriedade de se expandirem, reduzindo-lhes deste modo a resistência, em particular em condições de saturação (*ibid.*). Assim sendo, a expansão dos minerais argilosos contribui para acelerar a alteração das rochas (Sumner *et al.*, 2009), ao provocar o aumento da superfície específica da mesmas (acelera as reações químicas) e ao permitir que a água e as soluções salinas tenham acesso ao seu interior (Jeremias, 1991).

De acordo com Jeremias (*ibid.*), Maia (2001) e Duarte (2002), a alteração física das rochas pode decorrer de diversos mecanismos, como sejam:

- i. abrasão;
- ii. crescimento de cristais;
- iii. expansão;
- iv. secagem e embebição;
- v. cavitação;
- vi. fracturação por libertação de tensões e desnudação; e
- vii. insolação.

#### **2.5.3.1.1 - Abrasão**

A abrasão é um fenómeno que resulta de uma interação mecânica entre as partículas dos materiais rochosos. A fricção e/ou o impacto entre partículas em movimento, ou entre estas e outras fixas, promovem um desgaste superficial da rocha, tendo como consequência, a redução do seu tamanho e dos seus minerais constituintes (Jeremias, *op. cit.*; Maia, *op. cit.*). Este tipo de alteração é promovido pela ação do vento, ou em menor escala, pela ação dos glaciares, sendo que, em relação ao primeiro, a ação é puramente mecânica, e embora algo limitada, de acordo com Jeremias (*op. cit.*), decorre de modo continuado, promovendo a remoção dos produtos resultantes da alteração.

#### **2.5.3.1.2 - Crescimento de cristais**

A alteração por crescimento de cristais engloba fenómenos que envolvam a ação do gelo, gelivação, e o crescimento de cristais salinos, sendo este último um dos mecanismos que mais contribui para a degradação dos materiais de construção, como é o caso da pedra, do betão, da argamassa e dos materiais cerâmicos, entre outros (*ibid.*). Ambos os fenómenos materializam-se nas fissuras das rochas (*ibid.*).

A alteração mediante fenómenos de gelivação é explicada pelo facto da água, aquando da passagem do estado líquido para o sólido, aumentar até cerca de 9% do seu volume inicial (*ibid.*). Este fenómeno pode, em circunstâncias específicas, como no caso da água se encontrar confinada

pela obstrução das saídas, dar origem a pressões significativas que, no caso de serem superiores à resistência à tração das rochas, podem levar à sua desagregação (Jeremias, 1991). Neste campo, Jeremias (*ibid.*) realça o efeito de ciclos alternados de gelo e degelo, que originam a movimentação das partículas das rochas e que, terminada a descongelação, podem ocupar novas posições e/ou as partículas mais pequenas preencherem as fraturas, impedindo-as de voltar a fechar.

A alteração pelo crescimento de cristais explica-se com base em alguns processos, dos quais se destacam as pressões de hidratação, a retenção de água higroscópica e a expansão-retração dos sais devido a modificações na temperatura e na humidade (*ibid.*). Este tipo de fenómeno ocorre mediante a evaporação do solvente ou por variação de temperatura a partir de soluções sobressaturadas presentes no interior da rocha (*ibid.*).

Na tabela 2.40 apresentam-se os valores das tensões exercidas nas rochas por alguns dos fenómenos anteriormente abordados.

**Tabela 2.40** Tensões exercidas nas rochas por processos de alteração física (adaptado de Jeremias, 1991)

Processo	Tensão aplicada (MPa)
<i>Gelivação (máx. até -20 °C)</i>	200
<i>Cristalização de sais</i>	2-20
<i>Hidratação de sais</i>	100

#### 2.5.3.1.3 - Expansão

Os fenómenos de expansão têm origem nas reações físicas e químicas com a água estando, segundo Jeremias (*ibid.*), associados a um aumento do volume dos minerais, em especial dos minerais argilosos. Este fenómeno, só por si, pode induzir modificações significativas nas propriedades das rochas.

#### 2.5.3.1.4 - Secagem e embebição

A variação do teor em água das rochas, em especial, em climas frios, é tida como um dos fatores que mais contribui para a alteração das rochas (Hall, 1992 e Thorn, 1992 *in* Hall e Hall, 1996). É considerando o exposto anteriormente que é feita, recorrentemente, referência às alterações por secagem e embebição, como é o caso de Pissart e Lautridou (1984, e Hall, 1988 *in* Hall e Hall, *op. cit.*), que relatam que a sucessão de ciclos de secagem e embebição contribui, em grande medida, para a perda de coesão entre as partículas das rochas e para a sua completa desintegração. Em oposição ao anteriormente afirmado, Brock (1979 e Dube e Singh, 1972 *in* Hall e Hall, *op. cit.*) referem que as rochas com elevados teores em água podem apresentar-se mais resistentes face a solicitações mecânicas.

Ao mecanismo de alteração por secagem e embebição, apesar de carecer de uma base teórica sólida (Nepper-Christensen, 1965, Ollier, 1984 e Hall, 1988 *in* Hall e Hall, *op. cit.*), é-lhe reconhecido um papel importante na alteração de vários tipos de rochas, incluindo aquelas que não têm na sua constituição minerais argilosos. Uma possível explicação para o seu funcionamento é apresentada

por Ollier (1969 *in* Jeremias, 1991) segundo o qual, o facto das moléculas de água serem atraídas pelas partículas eletronegativas, faz com que formem com estas várias camadas de água orientadas de difícil remoção. Com sucessivos ciclos de secagem e embebição, as camadas vão-se sobrepondo umas às outras, o que provoca uma pressão nos vazios da rocha e a consequente fissuração e degradação.

De acordo com Jeremias (*op. cit.*), a eficácia dos fenómenos de secagem e embebição pode aumentar significativamente se, simultaneamente às variações do teor em água, ocorrerem variações de temperatura. Estas têm a capacidade de acelerar o processo de alteração devido à dilatação térmica dos minerais constituintes das rochas (*ibid.*).

#### **2.5.3.1.5 - Cavitação**

O mecanismo de cavitação ocorre em situações muito específicas, nomeadamente, quando o escoamento de água atinge velocidades elevadas consistindo, basicamente, na formação de bolhas de ar quando a pressão local atinge valores inferiores à pressão do vapor de água (*ibid.*). Face à necessidade de serem cumpridas condições específicas, como a velocidade de escoamento, este tipo de mecanismo de alteração é muito pouco relevante, assim como pouco frequente, se comparado com os restantes mecanismos de alteração física conhecidos (*ibid.*).

#### **2.5.3.1.6 - Fracturação por libertação de tensões e desnudação**

O desenvolvimento de microfissuras e de fraturas nos maciços rochosos ocorre devido à diminuição do campo de tensões e à consequente libertação da energia contida nas rochas, o que pode ocorrer, p. ex., aquando da abertura de cavidades subterrâneas e da escavação de taludes de grande envergadura, sobretudo em zonas com grande espessura de recobrimento, onde existam tensões de origem tectónica, ou ainda, em resultado de fenómenos de desnudação, que têm origem na erosão dos terrenos suprajacentes (*ibid.*).

As fraturas são geralmente paralelas à superfície de erosão, desenvolvem-se em quase todos os materiais geológicos, e são função da natureza do maciço rochoso e do seu campo de tensões (Duarte, 2002).

Nichols (1980 *in* Duarte, *op. cit.*) refere que “(...) as fraturas de descompressão podem ser mais pronunciadas devido às escavações que se fazem, associadas a certas obras de engenharia, a um ritmo geralmente rápido”, como é o caso, segundo Duarte (*op. cit.*), dos taludes de escavação resultantes de infraestruturas rodoviárias ou da exploração de pedreiras.

A formação e consequente abertura deste tipo de fraturas na superfície dos maciços rochosos proporcionam um acesso mais fácil aos agentes externos. É neste sentido que Price (1995 *in* Duarte, *op. cit.*), refere que a formação de fraturas pode representar a primeira etapa para a alteração das rochas, visto serem planos preferenciais para a circulação dos fluidos responsáveis pela alteração química.

### **2.5.3.1.7 - Insolação**

A alteração por insolação ocorre devido às variações de temperatura que se verificam durante um determinado período de exposição das rochas ao sol (Warke e Smith, 1998; Jeremias, 1991). Tendo em conta que os materiais rochosos são constituídos por diversas espécies minerais, com diferentes coeficientes de dilatação, a expansão e a contração dos mesmos podem originar o desenvolvimento de tensões internas nos materiais rochosos e, conseqüentemente a formação de microfissuras e a desagregação (Maia, 2001; Silva, 2007). De acordo com Jeremias (*op. cit.*), o fenómeno de insolação é um mecanismo sobretudo frequente em locais com grandes amplitudes térmicas, como é o caso das zonas desérticas.

### **2.5.3.2 - Mecanismos de alteração química**

A alteração química é o processo a partir do qual a rocha sofre modificações na sua composição química inicial, dando origem à formação de novas espécies minerais com características químicas e físicas diferentes das iniciais (Jeremias, *op. cit.*). Este tipo de alteração é caracterizado por reações químicas diversas entre a rocha e a solução aquosa intersticial (Ceryan *et al.*, 2008; Silva, *op. cit.*), tratando-se de um processo muito lento, complexo e variado, que depende de diversos fatores relacionados predominantemente com a rocha mãe, como sejam:

- i. composição mineralógica;
- ii. composição química;
- iii. forma e estrutura da jazida; e
- iv. condições climáticas regionais predominantes.

O maciço rochoso ou a rocha quando sujeitos à ação de substâncias dissolvidas na água, como sejam o O<sub>2</sub>, o CO<sub>2</sub> e os ácidos (Hunt, 1984 *in* Lopes, 2006), sofrem modificações na sua composição química inicial, resultando na lixiviação de alguns elementos solúveis (Silva, *op. cit.*; Ceryan *et al.*, *op. cit.*), ou na formação de novas espécies minerais, minerais secundários (Lopes, *op. cit.*; Loughnan, 1969 *in* Ceryan *et al.*, *op. cit.*), caracterizadas por apresentarem propriedades mineralógicas, químicas e físicas distintas das espécies iniciais, minerais primários (Jeremias, *op. cit.*). A formação de minerais secundários tem a sua explicação com base nas alterações das condições ambientais, pressão, temperatura, composição química, entre outros, existentes aquando da génese dos minerais primários (*ibid.*). A formação destes minerais pode traduzir-se num aumento de volume, o que cria pressões internas no corpo do material rochoso e pode levar à sua fragmentação (Duarte, 2002). Hunt (1984 *in* Lopes, *op. cit.*) refere alguns exemplos de espécies minerais alteradas, como os silicatos e os sulfuretos que, em contacto com determinadas substâncias, alteram-se para novos compostos como os hidróxidos, os sulfatos e os carbonatos (Silva, *op. cit.*).

De acordo com Loughnan (1969 *in* Ceryan *et al.*, 2008), na alteração química estão envolvidos três processos em simultâneo:

- i. desintegração da estrutura mineralógica inicial com a remoção e substituição dos elementos constituintes das moléculas;
- ii. transporte em solução do material removido; e
- iii. reconstituição do material removido com o contributo dos agentes externos, dando origem a novos minerais em equilíbrio com as condições do meio onde se encontram inseridos.

A alteração química é auxiliada pela diminuição da resistência mecânica da rocha, que leva a um aumento da superfície específica dos minerais e que, conseqüentemente facilita o contacto destes com os agentes de alteração. De acordo com Lopes (2006), a presença de fraturas no maciço rochoso pode resultar numa maior ou menor suscetibilidade do mesmo à ação dos mecanismos de alteração física.

De acordo com (Jeremias, 1991) e Maia (2001), a alteração química das rochas pode decorrer de diversos mecanismos, como sejam:

- i. carbonatação;
- ii. complexação;
- iii. hidratação;
- iv. hidrólise;
- v. oxidação e redução; e
- vi. dissolução.

Os mecanismos de alteração química têm maior relevância em climas quentes e húmidos, atuando durante longos períodos de tempo à escala geológica (Jeremias, *op. cit.*). Hudec (1997 *in* Lopes, *op. cit.*) refere que a hidratação, oxidação e dissolução são os mecanismos de alteração química mais efetivos em rochas e minerais não silicatados. Já Johnson e De Graff (1988 *in* Lopes, *op. cit.*) referem que, do ponto de vista geotécnico, a influência dos mecanismos de alteração química sobre o comportamento mecânico das rochas deve ser analisada tanto a curto, como a longo prazo dado que, a curto prazo, estes mecanismos podem originar problemas durante a fase construtiva da obra, ao passo que a longo prazo influenciam “(...) as propriedades físicas e mecânicas das rochas em um determinado local”.

#### **2.5.3.2.1 - Carbonatação**

A carbonatação é um dos mecanismos de alteração química que depende do tipo de clima local, das condições de drenagem, do tipo de rocha e da cobertura vegetal, para assumir maior ou menor importância na alteração da rocha (Duarte, 2002). Este tipo de alteração química consiste na reação dos iões carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) com os minerais da rocha (Jeremias, *op. cit.*; Maia, *op. cit.*), sendo particularmente importante nas rochas que contenham  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . As plagioclases estão entre os minerais mais suscetíveis a este tipo de alteração (Jeremias, *op. cit.*).

#### 2.5.3.2.2 - Complexação

A complexação ocorre em resultado da formação de ligações muito fortes entre um ião, correntemente um metal, e uma estrutura anelar do composto químico dos agentes da complexação (Jeremias, 1991; Maia, 2001). Os principais agentes envolvidos neste tipo de alteração são a matéria orgânica e o húmus (Maia, *op. cit.*), pelo que tal mecanismo ocorre sobretudo em regiões caracterizadas por grande densidade vegetal e ricas em húmus (Jeremias, *op. cit.*).

#### 2.5.3.2.3 - Hidratação

A hidratação consiste na adição de água a um mineral (Jeremias, *op. cit.*; Maia, *op. cit.*), sendo a sua presença nas espécies minerais detetada pelo grupo  $OH$  ou  $H_2O$  (Jeremias, *op. cit.*). Este tipo de alteração química, efetivo sobretudo em rochas e em minerais não-silicatados (Hudec, 1997 *in* Lopes, 2006), trata-se de uma reação exotérmica (Maia, *op. cit.*) à qual estão frequentemente associados fenómenos de expansão que podem originar a desintegração da rocha (Jeremias, *op. cit.*; Maia, 2011). É frequentemente acompanhada pela hidrólise, oxidação e carbonatação (Jeremias, *op. cit.*).

#### 2.5.3.2.4 - Hidrólise

A hidrólise é considerada o mecanismo de alteração química mais importante (Zaruba e Mencl, 1976 *in* Duarte, 2002) e aquele que conduz aos produtos finais da alteração nos climas temperados húmidos (Duarte, *op. cit.*). Este mecanismo é materializado por uma reação química, em meio aquoso, entre os iões  $H^+$  e  $OH$  da água e os iões ou elementos das espécies minerais constituintes da rocha (Jeremias, *op. cit.*; Maia, *op. cit.*; Duarte, *op. cit.*; Lopes, *op. cit.*). A reação ocorre sempre que o mineral se encontrar em contacto com a água. A intensidade com que a hidrólise se processa e as novas espécies minerais que são formadas dependem de um conjunto de fatores, como sejam a natureza dos minerais a alterar, o pH do meio aquoso, o clima e a própria drenagem do meio (Jeremias, *op. cit.*).

Nos minerais silicatados, caso dos feldspatos, micas, hornblendas  $[(Ca,Na)_2-3(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH,F)_2]$ , e augite  $[(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al)_2O_6]$ , entre outros, a hidrólise é o principal processo de alteração, consistindo essencialmente na entrada de iões de  $H^+$  para a estrutura do silicato e na saída de catiões, em que os mais comuns são o  $K^+$ , o  $Na^+$  e o  $Ca^{2+}$  (*ibid.*; Duarte, *op. cit.*). Os iões libertados por hidrólise podem simplesmente ser removidos pela escorrência das águas ou participarem na estrutura de minerais de neoformação ou de transformação, ficando desta forma, retidos nos produtos residuais da alteração (Duarte, *op. cit.*). De acordo com Aires-Barros (1991 *in* Duarte, *op. cit.*), a hidrólise de silicatos (feldspatos de vários tipos, micas, piroxenas, anfíbulas,

olivinas  $[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$ , entre outros) manifesta-se por intermédio de fenómenos de argilização (caulinização, montmorilonização), de saussuritização, de cloritização e de serpentinização.

Os minerais argilosos como a caulinite, a illite, e a montmorilonite  $[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$  (Duarte, 2002), são os principais produtos resultantes da hidrólise dos minerais alumino-silicatos (Lopes, 2006), sendo que o tipo de mineral resultante depende essencialmente da natureza da rocha mãe, quando em estados de alteração mais incipientes, e das condições ambientais, quando em estados de alteração mais avançados (Jeremias, 1991).

Apesar da importância do mecanismo de alteração tratado, este revela-se, à escala da vida de uma obra de engenharia civil, praticamente estático, ou seja, a alteração da rocha não ocorre durante um intervalo de tempo tão curto como aquele que interessa ao período de exploração da estrutura (*ibid.*). Como tal, sob o ponto de vista geotécnico, Jeremias (*ibid.*) refere que este mecanismo de alteração deve ser desprezado.

#### **2.5.3.2.5 - Oxidação e redução**

Como mecanismo de alteração, a oxidação significa uma reação com o oxigénio para formar óxidos, ou hidróxidos, no caso da reação conter também água (*ibid.*; Maia, 2001).

A oxidação processa-se em zonas muito próximas da superfície do terreno e assume especial importância nos casos em que a pirite, na presença de água, forma ácido sulfúrico e óxidos de ferro (Lopes, *op. cit.*), ou se verifica a alteração de minerais ferro-magnesianos (olivinas, piroxenas e anfíbolos), com a passagem de iões  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ , acompanhada por um aumento de volume dos minerais que pode levar à sua desagregação (Jeremias, *op. cit.*).

A redução, reação inversa à oxidação, ocorre sobretudo em ambientes anaeróbios, por ação de bactérias (*ibid.*).

#### **2.5.3.2.6 - Dissolução**

A dissolução é o mecanismo correspondente à passagem de uma espécie mineral para o estado líquido quando em contacto com a água (*ibid.*; Maia, *op. cit.*), sendo que, a intensidade com que este mecanismo se processa depende essencialmente da quantidade de água, da solubilidade dos minerais constituintes e do pH do meio (Maia, *op. cit.*; Duarte, *op. cit.*).

A solubilidade dos elementos químicos é variável. Neste sentido, a fim de se saber quais os que apresentam maior ou menor suscetibilidade a este tipo de alteração, é fundamental atender-se à ordem de solubilidade de cada elemento químico presente na composição química de cada espécie mineral, que, por ordem decrescente, é a seguinte:  $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Si} > \text{Al} > \text{Fe}$  (Duarte, *op. cit.*).

Em certa medida, praticamente todos os minerais são solúveis em água, porém conforme refere Jeremias (*op. cit.*), a importância deste tipo de alteração química remete-se apenas às rochas salinas, como sejam o sal-gema, o gesso, e em certa medida, o calcário, bem como a todas as rochas que contenham na sua constituição feldspatos hidrolisados.



## **2.5.4 - Efeitos da alteração nas propriedades das rochas**

### **2.5.4.1 - Resistência mecânica**

A utilização de materiais rochosos em obras de engenharia civil implica que estes sejam capazes de manter as suas propriedades com o decorrer do tempo. Desta forma, uma diminuição da sua resistência mecânica devido a fenómenos de alteração deve ser encarada com bastante preocupação dado que, regra geral, essa diminuição traduz-se numa redução do fator de segurança da obra.

Além dos casos clássicos, em que a resistência à compressão ou à tração da rocha diminui com o avançar do seu estado de alteração (Gupta e Seshagiri Rao, 2000; Gomes, 2001), pode também ocorrer a total desagregação da rocha, provocada pelo aparecimento e desenvolvimento de fraturas (Maia, 2001), pelo aumento da sua porosidade e pela perda de coesão entre as respetivas partículas constituintes (Beavis, 1985 *in* Gupta e Seshagiri Rao, *op. cit.*; Ceryan *et al.*, 2008; Marques *et al.*, 2010). Anon (1995 *in* Gupta e Seshagiri Rao, *op. cit.*) cita diversos estudos de investigação com resultados coerentes em relação à redução significativa da resistência à compressão uniaxial das rochas com o aumento do seu grau de alteração. Dearman e Irfan (1978 *in* Gupta e Seshagiri Rao, *op. cit.*), p. ex., referem que a resistência à compressão de um granito são para um medianamente alterados pode diminuir até 80%, e Gupta e Seshagiri Rao (*op. cit.*), que a resistência à compressão de basaltos e granitos são para completamente alterados pode diminuir até 98%.

A diminuição da resistência mecânica decorrente do acréscimo no estado de alteração das rochas não se aplica, contudo, aos casos de estados avançados de laterização. Nestes, a alteração de minerais ferromagnesianos resulta na libertação de  $FeO$  e de hidróxidos de ferro ( $FeO_2$ ) que ao cimentarem os outros constituintes minerais, conferem à rocha um aumento considerável de resistência física e mecânica (Farjallat, 1971 *in* Gomes, *op. cit.*).

### **2.5.4.2 - Deformabilidade**

Gomes (*op. cit.*) e Maia (*op. cit.*) realçam a influência da alteração das rochas na respetiva deformabilidade, em resultado de modificações na natureza dos grãos minerais e nas ligações entre os mesmos. Ideia corroborada por Gupta e Seshagiri Rao (*op. cit.*), Tugrul (2004) e Ceryan *et al.* (*op. cit.*), quando referem que o módulo de deformabilidade das rochas decresce gradualmente com o avanço do seu estado de alteração. Marques *et al.* (*op. cit.*), seguindo a mesma linha de raciocínio, salientam os estudos desenvolvidos por Hamrol (1961), Iliev (1966), Duncan e Dunne (1967), Irfan e Dearman (1978), Irfan e Powell (1985), para rochas graníticas; por Pasamehmetoglu *et al.* (1981) e Turk *et al.* (1994), para rochas andesíticas; e por Beavis *et al.* (1982) e Beavis (1985), para rochas sedimentares.

#### **2.5.4.3 - Porosidade**

A porosidade das rochas varia em função do processo de alteração e do tipo de rocha (Ceryan, 2008; Ceryan *et al.*, 2008; Marques *et al.*, 2010), sendo importante propriedade física dado condicionar a durabilidade (Hudec, 1989 *in* Dhakal, 2004), a deformabilidade e a permeabilidade das rochas (Franklin e Dusseault, 1991 *in* Tugrul, 2004). No caso particular da *P*, sabe-se que esta constitui uma via natural para a livre circulação de fluidos no interior das rochas podendo, deste modo, desempenhar um papel importante na sua durabilidade (Simão, 2003).

De um modo geral, os processos de alteração levam a um aumento da porosidade das rochas, quer pelo aumento de fissuração, quer por desaparecimento de material (Jeremias, 1991), sendo as rochas mais porosas as que se apresentam mais suscetíveis à alteração (Simão, *op. cit.*). Gupta e Seshagiri Rao (2000), com base em ensaios realizados com quartzitos, granitos e basaltos, corroboram o exposto, ao concluírem que a porosidade dos referidos materiais naturais aumentou significativamente com o avançar do seu estado de alteração. No caso do basalto, a *P* passou de 0,64% para 29,52%, muito superior ao apresentado por um quartzito (de 0,07% para 10,83%) e um granito (de 0,09% para 21,92%). Begonha e Sequeira Braga (2000) e Tugrul (*op. cit.*) partilham da mesma opinião, ao referirem que a porosidade das rochas aumenta para os estados de alteração mais avançados.

#### **2.5.5 - Importância da alteração na durabilidade das rochas**

A avaliação da alteração e da durabilidade das rochas e maciços rochosos constituem dois dos problemas mais complexos a dar resposta por parte da engenharia civil e áreas afins (Maia, 2001), tratando-se de uma etapa de primordial importância, nomeadamente na seleção dos agregados naturais a utilizar “(...) como material de construção (enrocamentos, agregados e manchas de empréstimo, entre outros) na escolha de locais para a implantação das obras e na definição da profundidade de saneamento necessária das respetivas fundações, e na análise da estabilidade de taludes, dada a conhecida relação entre o estado de alteração das rochas e as suas características físicas, mecânicas e hidráulicas” (Pinho, 2003).

Perante a possibilidade das rochas modificarem as suas características ao longo do período de vida útil das obras de engenharia civil, torna-se indispensável a utilização de métodos que permitam prever, com razoável aproximação, a sua durabilidade com vista a garantir que o colapso das obras não ocorra por meio da ruína prematura dos materiais (Jeremias, 1991). Neste contexto, a seleção dos materiais rochosos deve ter em conta a adequabilidade das suas características físicas e mecânicas em relação ao tipo de obra onde irão ser aplicados (*ibid.*).

A durabilidade dos materiais rochosos é condicionada pelo tipo de carregamento a que a estrutura fica sujeita na fase de serviço e pelas condições hidrogeológicas dos terrenos (*ibid.*). Os carregamentos impostos tanto podem ser de carácter estático, p. ex., muros de gabiões e enrocamentos de proteção, como de carácter dinâmico, quando transmitidas repetidamente por

contínuos ciclos de carga, p. ex., em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários (Jeremias, 1991). Já em relação às condições hidrogeológicas, sabe-se que o aumento do grau de saturação das rochas conduz à redução da resistência do material (*ibid.*).

Fookes *et al.* (1988 *in* Maia, 2001) apresenta uma lista de casos de colapso de obras cuja ocorrência decorreu da utilização de materiais rochosos de origem ígnea com características inadequadas para serem utilizados como materiais de construção (tabela 2.41). Outros exemplos são dados por Struillou, (1969 e 1971 *in* Jeremias, *op. cit.*) referindo-se a vários casos de alteração que, em poucos anos, levaram à instabilização de taludes cujo desmonte foi realizado inicialmente com recurso a explosivos, e por Delgado Rodrigues (1975 *in* Jeremias, *op. cit.*), neste caso sobre a rápida alteração sofrida por mafritos (gabros da Azóia) utilizados na pavimentação de algumas ruas da cidade de Lisboa.

**Tabela 2.41** Casos históricos de rápida degradação de materiais rochosos (adaptado de Fookes *et al.*, 1988 *in* Maia, 2001)

Autor	Obra	Material utilizado	Tempo	Local	Causa da degradação
<b>Scott (1955)</b>	Pavimentos rodoviários	Basalto	<5 anos	Nordeste dos EUA	Percentagem elevada de minerais secundários alterados.
<b>Minor (1960)</b>	Pavimentos rodoviários	Basalto	3 meses	EUA (Washington)	Presença de minerais secundários.
<b>Day (1962)</b>	Pavimentos rodoviários	Basalto	-	EUA (Idaho)	Presença de minerais secundários e desagregação.
<b>Weinert (1964, 1968)</b>	Pavimentos rodoviários	Diorito	-	África do Sul	Presença de minerais secundários.
<b>Hosking e Tubey (1969)</b>	Pavimentos rodoviários	Basalto olivínico e diorito	-	Reino Unido (Derby e Hampshire)	Alteração <i>in situ</i> .
	Pista de aeroporto	Ígnea básica	18 meses	Mauritius	Presença de minerais secundários.
<b>Smith et al. (1970)</b>	Barragem de enrocamento	Vários	Variável	EUA	Alteração física.
<b>Balch (1972)</b>	Pavimentos rodoviários	Basalto	-	Nova Zelândia (Glenbrook)	Efeitos de humidade no material de alteração.
<b>Cole e Lancuchi (1976)</b>	Estrutura de betão	Basalto	-	Austrália (Victoria)	Fragmentação do agregado.
<b>Minty (1976)</b>	Pavimentos rodoviários	Rocha vulcânica heterogénea	-	Austrália (Nova Gales do Sul)	Presença de argilas expansivas e permeabilidade da rocha.
<b>Cawsey e Massey (1984)</b>	Pavimentos rodoviários	Diorito	<1 ano	Sudoeste de Inglaterra	Desagregação física dos agregados.
<b>Mellon (1985)</b>	Pavimentos rodoviários	Basalto	<5 anos	Etiópia	Desagregação física devido ao aumento das fissuras.
<b>Ferreira et al. (1990)</b>	Barragem de enrocamento e agregados	Basalto	-	Brasil	Presença de microfissuras e minerais argilosos expansivos.
<b>Marrano (1997)</b>	Barragem de enrocamento e agregados	Basalto	-	Brasil	Presença de microfissuras e minerais argilosos expansivos.

Outros exemplos são, ainda, apresentados por Farjallat *et al.* (1972, Signer, 1973 e Cruz, 1996 *in* Maia, *op. cit.*), referindo-se aos basaltos compactos da Barragem de Capivara, localizada no Rio Paranapanema, entre os estados de São Paulo e Paraná. Segundo os referidos autores, os basaltos desagregaram-se por completo após exposição aos agentes atmosféricos.

Na tabela 2.42 apresentam-se os principais mecanismos de alteração dos materiais rochosos em diferentes tipos de obras de engenharia

**Tabela 2.42** Principais mecanismos de alteração dos materiais rochosos em algumas obras de engenharia (adaptado de Jeremias, 1991)

Obra	Estrutura	Principal mecanismo de alteração					
		Abrasão	Impacto	Esmagamento	Cristalização de sais	Gelivação	Secagem/embebição
<i>BE</i>	<i>D</i>	-	-	X	-	x	-
<i>CDE</i>	<i>D</i>	X	X	X	(X)	X	X
<i>EP/TE</i>	<i>E</i>	-	-	-	(X)	X	X
<i>D</i>	<i>E</i>	(X)	-	-	-	(X)	X
<i>BF</i>	<i>E+D</i>	-	X	X	-	X	X
<i>EM</i>	<i>E+D</i>	X	-	-	X	-	X

Legenda: X - importante; (X) pode ser importante; (BE) Bases de Estradas; (CDE) Camadas de Desgaste de Estradas; (EP/TE) Enrocamento de Proteção em Taludes de Escavação; (D) Drenos; (BF) Balastros para Ferrovias; (EM) Enrocamentos Marítimos; (E) Estático; (D) Dinâmico

## 2.5.6 - Métodos de avaliação da durabilidade

### 2.5.6.1 - Considerações gerais

Os materiais rochosos quando empregues em obras de engenharia civil devem manter as suas características intactas, ou pelo menos, que a sua degradação com o tempo de utilização não os torne incompatíveis com a sua função em obra (Jeremias, 1991). Com vista a se projetar para o futuro, de forma fiável e criteriosa, a evolução das características dos materiais rochosos quando utilizados em tal estrutura é prática corrente e recomendável realizarem-se ensaios de durabilidade (Quinta Ferreira, 1990; Jeremias, *op. cit.*; Gomes, 2001; Simão, 2003). Estes ensaios diferem dos métodos de avaliação do estado de alteração das rochas, visto estes métodos procuram traduzir, com o maior rigor possível, as propriedades dos materiais rochosos no momento da sua caracterização, não procedendo à previsão do seu comportamento (Jeremias, *op. cit.*)

Para obtenção de resultados credíveis durante a realização dos ensaios de durabilidade é indispensável que as condições laboratoriais reflitam, o mais aproximadamente possível, os mecanismos de alteração química, física e mecânica a que os materiais estarão sujeitos durante o período da sua utilização em obra (Jeremias, *op. cit.*; Warke e Smith, 1998, Simão, *op. cit.*). Estes ensaios envolvem ações mais agressivas que as resultantes dos agentes de alteração, uma vez que, em laboratório, os resultados obtidos correspondem a um período de tempo muito inferior ao do tempo de serviço em obra (Quinta Ferreira, *op. cit.*). Contudo, Gomes (*op. cit.*), não deixa de alertar para a dificuldade em representar em laboratório as condições verificadas *in situ*, sendo uma das razões para tal a variabilidade das propriedades geotécnicas dos materiais rochosos (Verhoef e Van De Wall, 1998 *in* Gomes, *op. cit.*). Deste modo, os resultados obtidos em laboratório, muitas vezes, correspondem a uma aproximação do valor real da propriedade estudada (Gomes, *op. cit.*).

Dos vários ensaios conhecidos para a avaliação das características de durabilidade das rochas, Quinta Ferreira (*op. cit.*) destaca os seguintes:

- i. ensaios de previsão de comportamento, como o ensaio de gelo-degelo, o ataque por sulfatos, o etileno-glicol e a secagem-embebição;
- ii. métodos petrográficos;
- iii. ensaios para a determinação de propriedades índice, como a absorção de água e a porosidade; e
- iv. ensaios de desgaste, como o de *Los Angeles* e de DMA (tratado na secção 2.5.6.2)

No caso particular dos materiais rochosos com proporções significativas de minerais argilosos expansivos na sua composição, tenderá a verificar-se uma degradação progressiva das suas características mecânicas que, em obra, poderá ser rápida e importante (Quinta Ferreira, 1990; Jeremias, 1991). A contínua repetição de fenómenos de secagem-embebição destes minerais envolve uma alternância muito significativa no estado de tensão do corpo da rocha, o que, associado à diminuição da resistência da mesma, em consequência da molhagem, acelera a sua degradação (Quinta Ferreira, *op. cit.*). Outros fatores igualmente relevantes prendem-se com o tipo de mineral argiloso, dado a capacidade de adsorção e absorção variar, e com o modo como os minerais argilosos se encontram distribuídos na rocha, uma vez que, de acordo com Delgado Rodrigues (1986 *in* Quinta Ferreira, *op. cit.*), mesmo para reduzidas quantidades de tais minerais, “(...) a sua concentração em planos preferenciais na rocha (...)” pode criar “(...) zonas de menor resistência propícias à fraturação (...)” e consequentemente à desagregação de blocos de rocha. Para despistar a presença de minerais argilosos no corpo dos materiais rochosos são utilizados os seguintes ensaios: (1) o ensaio de DMA; (2) o ensaio de secagem e embebição; (3) o ensaio de etileno-glicol; (4) o ensaio de titulação com azul de metileno e (5) o ensaio de adsorção de água em atmosfera de humidade relativa controlada (pouco utilizado e muito sensível às condições do ensaio).

Jeremias (*op. cit.*) refere o ensaio de gelo-degelo e o ensaio de ataque pelos sulfatos como, presumivelmente, os mais utilizados na previsão da durabilidade das rochas, sendo os seus valores admitidos como índices em muitos critérios de aceitação de materiais. Contudo, por um lado, de acordo com o mesmo autor, a realização daqueles ensaios tem como inconveniente a longa duração, a modificação ou a substituição do mecanismo de alteração e a difícil comparação de resultados de rocha para rocha. Por outro, Quinta Ferreira (*op. cit.*) afirma que estes dois ensaios são frequentemente utilizados para além “(...) dos seus limites de validade (...)” citando a este propósito Delgado Rodrigues (1990), que se refere à situação em que se pretende “(...) prever o comportamento da rocha a partir de ensaios que pouco ou nada têm em comum como os fenómenos que vão provocar a deterioração da rocha na obra”. Outros autores, citados por Quinta Ferreira (*op. cit.*), encaram os referidos ensaios com algumas reservas. Narvaez (1980 *in* Quinta Ferreira, *op. cit.*) refere que o ensaio de ataque pelos sulfatos ou o etileno-glicol são pouco representativos das condições verificadas em campo, ainda que possa ser útil a sua interpretação conjuntamente com o comportamento da estrutura. Já Fernandez-Gago (1979 *in* Quinta Ferreira, *op. cit.*) concluiu que, ao invés do verificado com o ensaio de ataque pelos sulfatos, os ensaios de secagem e embebição e de gelo-degelo, não se mostram suficientemente agressivos ao fim de 25 ciclos para permitirem aferir sobre a durabilidade, p. ex., das rochas graníticas.

O ensaio de gelo-degelo procura reproduzir em laboratório o fenómeno natural da gelivação, medindo a resistência do material às pressões cíclicas provocadas pela congelação da água (Jeremias, 1991), fator que pode levar à fissuração ou à desagregação das rochas quando os poros são preenchidos por água que se pode converter em gelo (Simão, 2003).

O ensaio de ataque pelo sulfato de sódio ou de magnésio, por seu turno, procura simular o mecanismo de alteração devido ao crescimento dos cristais salinos (Quinta Ferreira, 1990; Jeremias, *op. cit.*). Segundo Delgado Rodrigues e Jeremias (1989 *in* Jeremias, *op. cit.*), este ensaio permite estabelecer uma relação direta entre a porosidade dos materiais rochosos e o número de ciclos para a sua desintegração, ao evidenciar que amostras mais porosas ou expansivas são mais facilmente atacadas, desintegrando-se ao fim de um número de ciclos reduzido.

O ensaio de etileno-glicol baseia-se no facto de os minerais argilosos expansivos, em contacto com aquele composto químico, aumentarem de modo muito significativo o seu volume (Jeremias, *op. cit.*; Fielding e Macarrone, 1982 *in* Bell e Hankins, 1997), sendo possível, deste modo, saber-se da existência de minerais argilosos expansivos no corpo da rocha, e o modo como esta resistirá à expansão (Delgado Rodrigues, 1976 *in* Quinta Ferreira, *op. cit.*; Bell e Hankins, *op. cit.*). No caso da presença significativa de minerais argilosos expansivos na rocha, é de esperar uma diminuição das suas características mecânicas em virtude da expansão de tais minerais (Quinta Ferreira, *op. cit.*). Segundo Delgado Rodrigues (1976 *in* Jeremias, *op. cit.*), a quantificação da diminuição da resistência das amostras tratadas com etileno-glicol é efetuada mediante a comparação com os resultados obtidos nos ensaios de DMA, entre amostras tratadas e não tratadas.

O ensaio de secagem e embebição pretende avaliar a resistência da rocha a variações cíclicas do teor em água, sendo esta avaliação realizada com base na facilidade com que o material se separa em fragmentos mais finos sem que se verifique quaisquer tipos de modificações químicas na rocha (Jeremias, *op. cit.*).

Os métodos petrográficos podem também ser empregues na previsão da durabilidade das rochas, apesar da sua pouca difusão e utilização. Wylde (1982 *in* Jeremias, *op. cit.*) desenvolveu um índice petrográfico denominado “fator textura” que permite avaliar, para agregados basálticos empregues em infraestruturas rodoviárias, a redistribuição da fração argilosa provocada pelo carregamento imposto pelo tráfego e que, segundo o mesmo autor, é a causa das frequentes roturas nos pavimentos rodoviários.

Para além dos vários ensaios apresentados, podem ainda referir-se, segundo Quinta Ferreira (*op. cit.*) e Jeremias (*op. cit.*), vários outros métodos utilizados na avaliação da durabilidade dos materiais rochosos, como sejam os ensaios que se socorrem de propriedades índice: (1) o ensaio pela água oxigenada proposto por Struillou (1969 *in* Jeremias, *op. cit.*); (2) a expansibilidade das rochas por embebição conjugada com a resistência à compressão (Olivier, 1976 *in* Quinta Ferreira, *op. cit.*); (3) a expansibilidade das rochas conjugada com a relação entre a resistência à compressão no estado seco e saturado (Felix, 1987 *in* Quinta Ferreira, *op. cit.*), (4) a expansibilidade das rochas conjugada com a porosidade (Delgado Rodrigues, 1988 *in* Jeremias, *op. cit.*) e (5) o índice de durabilidade IRD, definido por Delgado Rodrigues e Jeremias (1990 *in* Quinta Ferreira, *op. cit.*), com base na porosidade, na resistência e na expansibilidade dos materiais rochosos, “(...) assumindo que

a cristalização dos sais e a expansão dos minerais argilosos são os principais mecanismos de degradação das rochas (...). A utilização de propriedades índice para a avaliação da durabilidade dos materiais rochosos é de grande interesse quando se recorre a ensaios simples e de rápida execução, utilizados em conjugação com o “(...) conhecimento dos materiais e com as suas características mais relevantes” (Quinta Ferreira, 1990).

Por último, refira-se, ainda, que a durabilidade dos materiais rochosos pode ser avaliada mediante a realização de ensaios de caracterização física e mecânica, assim como, através da comparação entre as propriedades dos materiais ensaiados e de materiais semelhantes mas já utilizados em obras (Quinta Ferreira, *op. cit.*). Em relação a este último caso, Gomes (2001) apresenta uma tabela (tabela 2.43), adaptada de Verhoef e Van De Wall (1998), onde constam os valores típicos para agregados naturais a utilizar em obras de engenharia civil. Estes valores resultam de casos históricos, de pesquisas académicas e da experiência já adquirida na área.

**Tabela 2.43** Guia para a avaliação da qualidade de agregados naturais (adaptado de Gomes, 2001)

Propriedade	Excelente	Boa	Razoável	Fraca
$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	>2,9	2,6 - 2,9	2,3 - 2,6	<2,3
Absorção de água (%)	<0,5	0,5 - 2	2 - 6	>6
Porosidade (%)	<2	2 - 3	3 - 4	>4
Gelo-degelo (%)	<0,1	0,1 - 0,5	0,5 - 2	>2
Adsorção de azul-de-metileno (g/100 g)	<0,4	0,4 - 0,7	0,7 - 1	>1
Resistência à compressão simples (MPa)	>200	100 - 200	50 - 100	<50
Resistência à carga pontual (MPa)	>8	4 - 8	1,5 - 4	<1,5
Resistência ao esmagamento (%)	<20	20 - 25	25 - 30	>30
Resistência ao impacto (%)	<20	20 - 25	25 - 30	>30
Resistência à abrasão (%)	<40	40 - 45	45 - 50	>50

Legenda: (a) sem referência ao tipo de porosidade

Na secção que se segue apresenta-se de um modo mais detalhado o ensaio de DMA na medida em que foi o ensaio adotado no presente estudo para se proceder à avaliação da durabilidade dos agregados reciclados e naturais selecionados.

### 2.5.6.2 - Ensaio de DMA

O ensaio de DMA, desenvolvido por Franklin e Chandra (1972) e posteriormente recomendado pela ISRM (1977) e normalizado pela ASTM D4644 (2008) (Crosta, 1998; Jeremias, 2000), trata-se de uma técnica laboratorial que tem como propósito avaliar a resistência do material rochoso, em particular rochas silto-argilosas (Jeremias, *op. cit.*), ao desgaste e à desintegração quando submetido a dois ciclos de secagem e embebição (ISRM, 1977), e, ainda, aferir sobre a influência da água nos materiais ensaiados (Jeremias, 1991).

O ensaio de DMA envolve a realização de dois ciclos de desgaste, cada um de duração de 10 min e decorre à velocidade constante de 20 rpm, e permite obter o índice de durabilidade -  $I_{d1}$ , do material calculado no final do segundo ciclo de desgaste e que se representa pelo símbolo  $I_{d2}$ . Uma variante do ensaio permite obter o índice  $I_{d5}$ , que embora em rigor devesse corresponder a 5 ciclos de desgaste de 200 rotações cada um, na realidade correspondem a 3 ciclos de desgaste, com os dois primeiros a 200 rotações cada um e o terceiro com 600 rotações.

Com base no valor de  $I_d$ , Gamble (1971) definiu uma classificação para a durabilidade dos materiais e que se apresenta na tabela 2.44. De acordo com esta, a durabilidade dos materiais rochosos pode variar de muito baixa a muito elevada, consoante os valores de  $I_{d2}$  forem respetivamente inferiores a 30% e superiores a 98%.

**Tabela 2.44** Classificação da durabilidade dos materiais rochosos com base no  $I_d$  (adaptado de Gamble, 1971)

Classe	$I_{d1}$	$I_{d2}$	$I_{d5}$
	(%)		
<b>Muito elevada</b>	>99	>98	>95
<b>Elevada</b>	98 - 99	95 - 98	85 - 95
<b>Média a elevada</b>	95 - 98	85 - 95	60 - 85
<b>Média</b>	85 - 95	60 - 85	30 - 60
<b>Baixa</b>	60 - 85	30 - 60	20 - 30
<b>Muito baixa</b>	<60	<30	<20

Legenda:  $I_{d1}$  - valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do primeiro ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio;  $I_{d2}$  - valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do segundo ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio;  $I_{d5}$  - valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do quinto ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio

Ainda que o ensaio de DMA decorra segundo procedimentos normalizados, conforme referido inicialmente nesta secção, Crosta (1998) e Franklin e Chandra (1972 in Kolay e Kayabali, 2006) alertam para o facto dos resultados obtidos para amostras do mesmo material rochoso poderem variar significativamente em função dos fatores que se apresentam na tabela 2.45.

**Tabela 2.45** Fatores que condicionam a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios de DMA (adaptado de Crosta, 1998; e Franklin e Chandra, 1972 in Kolay e Kayabali, 2006)

Fator	Condicionante
<b>Equipamento</b>	Tambor, dimensão da malha da rede e velocidade de rotação
<b>Amostra</b>	Tamanho, forma, peso e número de provetes
<b>Rocha</b>	Porosidade, permeabilidade, fraturação, presença de minerais argilosos expansivos, laminação e compactação
<b>Armazenamento da amostra</b>	Temperatura e tempo da secagem
<b>Duração do ensaio e tipo de fluido</b>	Número de ciclos, tempo de embebição, e natureza e temperatura do fluido do ensaio

No que respeita à rugosidade e à forma, Kolay e Kayabali (*op. cit.*) referem que estas duas características influenciam os resultados finais, sobretudo em rochas brandas ou com presença de minerais argilosos mais suscetíveis ao desgaste e à desintegração.

Em função do grau de rugosidade da superfície dos provetes, maior ou menor será o atrito entre a superfície do provete e a malha do tambor e, consequentemente maior ou menor o desgaste do provete, respetivamente. Além do referido, uma maior rugosidade implica uma maior área de superfície do provete.

Em relação à forma, nos estudos desenvolvidos por Kolay e Kayabali (2006), os valores obtidos para provetes angulares foram até 28% mais baixos comparativamente com os obtidos com provetes arredondados. Contudo, estes autores refutam a ideia de que da utilização de provetes arredondados se traduza em resultados menos realistas.

Taylor e Spears (1981 in Jeremias, 2000) alertam para a fraca reprodutibilidade dos resultados obtidos nos ensaios de DMA com rochas silto-argilosas brandas e alteradas quando submetidas apenas a dois ciclos de desgaste. No caso de rochas mais resistentes, Jeremias (1991) refere que,



seguindo a versão recomendada pelo método, os desgastes verificados por estas são muito reduzidos e influenciados pela forma inicial dos seus provetes.

Seguindo a mesma linha de conclusiva, Ulusay *et al.* (1995, Bell e Hankins, 1997, Gokceoglu *et al.*, 2000 e Yagiz e Akyol, 2008 *in* Yagiz, 2010) previnem para a necessidade de se proceder à realização de ciclos de desgaste adicionais em relação aos previstos pelo método, sendo expectável, nestes casos, uma diminuição do valor de  $I_d$  (Agustawijaya, 2003). Taylor (1988 *in* Erguler e Ulusay, 2009) propõe a realização de três ciclos de desgaste, de forma a melhorar a consistência nos resultados finais, enquanto que Jeremias (2002), o prolongamento do tempo de ensaio para 1 h ou 2 h, de modo a obter desgastes superiores e minimizar os erros associados à forma dos provetes. Já Gamble (1971 e Gokceoglu *et al.*, 2000 *in* Erguler e Ulusay, *op. cit.*) sugerem que a realização de três ou mais ciclos deva ser tida em consideração sempre que forem ensaiadas rochas de durabilidade elevada. Delgado Rodrigues *et al.* (1994 *in* Pacheco Torgal e Castro-Gomes 2006) adiantam que no ensaio de rochas mais resistentes, deve-se optar por sujeitar o material a 1400 rotações durante um período de 50 min, o que corresponde a sete ciclos de desgaste.

Gamble (1971, Franklin e Chandra, 1972, Venter, 1980 e Hopkinse e Deen, 1984 *in* Jeremias, *op. cit.*) estudaram também algumas das condicionantes anteriormente apresentadas (tabela 2.46), o que demonstra a pretensão em tornar o ensaio de DMA um método de avaliação de durabilidade dos materiais rochosos cada vez mais fiável.

**Tabela 2.46** Condicionantes do procedimento laboratorial do ensaio de DMA (Gamble, 1971(\*); Franklin e Chandra, 1972(\*\*); Venter, 1980(\*\*\*) ; Hopkinse e Deen, 1984(\*\*\*\*) *in* Jeremias, 2000)

Variável	(*)	(**)	(***)	(****)
<i>Dimensão da malha da rede</i>	-	x	x	-
<i>Massa e número de provetes</i>	x	x	-	-
<i>Teor em água inicial da amostra</i>	-	x	-	x
<i>Temperatura de secagem</i>	-	-	x	-
<i>Tempo de secagem</i>	-	x	-	-
<i>Tempo de embebição</i>	x	x	-	x
<i>Número de ciclos</i>	x	-	x	x
<i>Natureza e temperatura do fluido do ensaio</i>	-	x	-	-

A par do exposto anteriormente, há ainda a salientar algumas limitações reconhecidas ao ensaio de DMA, que, de acordo com Erguler e Ulusay (*op. cit.*) são as seguintes: (1) a imersão dos provetes no meio aquoso durante 10 min pode não ser suficiente para a sua total saturação; (2) a desintegração dos provetes é influenciada pela colisão entre estes e o tambor; e (3) os provetes devem apresentar preferencialmente um formato esférico e arestas arredondadas.

## 2.5.7 - Casos de estudo de avaliação da durabilidade de basaltos e calcários

### 2.5.7.1 - Basaltos

#### 2.5.7.1.1 - Sharma e Singh (2008)

Sharma e Singh (2008) procederam à realização de um conjunto de ensaios com o objetivo de estabelecer uma correlação entre a velocidade de propagação das ondas P e o  $I_{d2}$ , a resistência ao impacto e a resistência à compressão uniaxial. A execução do ensaio de DMA decorreu de acordo com as recomendações propostas pela ISRM (1977), à exceção do número de provetes utilizados, que foram nove, no lugar dos dez previstos.

Na tabela 2.47 apresentam-se, apenas, os valores obtidos para as amostras de basalto por se tratar de um dos dois agregados naturais selecionados para o estudo experimental efetuado no âmbito desta dissertação.

**Tabela 2.47** Resultados dos ensaios realizados com amostras de basalto (adaptado de Sharma e Singh, 2008)

Basalto (alterado)	Velocidade das ondas P (m/s)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	$I_{d2}$ (%)	Resistência ao impacto (%)
<b>Basalto 1</b>	2853,0	66,0	98,9	92,6
<b>Basalto 2</b>	2730,2	58,0	97,0	91,9
<b>Basalto 3</b>	2899,6	64,0	97,8	93,9
<b>Basalto 4</b>	3026,2	72,0	97,7	91,9

No que respeita à durabilidade do basalto, ainda que os autores não tenham apresentado qualquer conclusão sobre esta temática, de acordo com a classificação proposta por Gamble (1971), o basalto apresenta uma durabilidade elevada a muito elevada.

#### 2.5.7.1.2 - Ozsoy *et al.* (2010)

Ozsoy *et al.* (2010) procederam à realização de vários ensaios com vista à caracterização física e mecânica de diversos tipos de rocha, entre as quais o basalto, amostradas no local da barragem de Yakakayi, Turquia. Da reduzida informação disponibilizada por parte dos autores no que respeita ao basalto ensaiado, refira-se que este apresentava uma cor verde e os seguintes minerais na sua constituição mineralógica: augite, plagioclase e minerais opacos.

Na tabela 2.48 apresentam-se os valores obtidos dos diferentes ensaios de caracterização física e mecânica realizados com as amostras de basalto. A execução do ensaio de DMA decorreu de acordo com as recomendações propostas na norma editada pela ISRM (*op. cit.*).

**Tabela 2.48** Resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica realizados com amostras de basalto (adaptado de Ozsoy *et al.*, 2010)

Propriedade		Valor
<b>Física</b>	Massa volúmica (Mg/m <sup>3</sup> )	2,96
	Absorção de água (%)	0,08
	Teor em água (%)	0,13
	Porosidade (%)	0,64
<b>Mecânica</b>	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	63,02
	Resistência à carga pontual (MPa)	2,25
	Resistência à tração uniaxial (MPa)	8,80
	Durabilidade	$I_{d1}=88,0$ $I_{d2}=81,0$

Com base nos resultados do  $I_d$ , os autores concluíram que o basalto apresenta uma durabilidade elevada, sem indicarem, contudo, a classificação utilizada. Pela classificação de Gamble (1971), o basalto teria uma durabilidade média.

### 2.5.7.2 - Calcários

#### 2.5.7.2.1 - Delgado Rodrigues (1986)

O LNEC, no sentido de contribuir para o estudo das rochas carbonatadas e para a sua classificação geotécnica, procedeu à realização de um conjunto de ensaios, entre os quais, ao ensaio de DMA.

De acordo com o procedimento adotado para a execução do ensaio de DMA, as amostras de calcários foram inicialmente sujeitas a um ciclo de desgaste de duração de 10 min em água e a seco. No sentido de submeter as amostras a condições de ensaio mais agressivas do que as previstas no método, foi realizado um segundo ciclo, este com a duração de 60 min e igualmente em água e a seco. Os resultados que se apresentam na tabela 2.49 permitiram concluir sobre a influência da água nas propriedades do material.

**Tabela: 2.49** Resultados dos ensaios de DMA realizados com amostras de calcário (adaptado de Delgado Rodrigues, 1986)

Amostra	$I_{d1}$		$I_{d6}$	
	Seco (%)	Em água (%)	Seco (%)	Em água (%)
<b>CM1</b>	99,7	99,3	99,3	96,7
<b>CM2</b>	99,8	99,6	99,3	98,8
<b>CM3</b>	99,8	99,7	99,3	98,6
<b>CM19</b>	99,7	99,4	99,2	97,8
<b>CM20</b>	99,7	99,6	99,2	98,0

Legenda:  $I_{d6}$  - Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do sexto ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio; (CM) Calcário de Mondego

Os resultados obtidos para o calcário evidenciaram a existência de uma relação direta entre desgastes mais elevados e o aumento do tempo de ensaio, no caso do ensaio se realizar em água, e, ainda, que a realização de um ensaio com a duração de 60 min é uma versão satisfatória para avaliar a durabilidade de rochas calcárias. No que respeita à durabilidade do CM do ponto de vista

qualitativo, trata-se de uma rocha de durabilidade muito elevada segundo a classificação de Gamble (1971).

#### 2.5.7.2.2 - Conde *et al.* (2004)

Com vista à definição de um método que permitisse avaliar a aplicabilidade dos agregados naturais através de ensaios efetuados sobre rochas, Conde *et al.* (2004) realizaram um conjunto de ensaios de caracterização química e mecânica em rochas e agregados de origem calcária.

Para a execução dos ensaios foram recolhidos três calcários pertencentes à Orla Mesocenozóica Ocidental portuguesa. Dois calcários (1 e 2) pertenciam à mesma formação geológica, constituinte da sub-bacia de Arruda dos Vinhos, e um terceiro a uma outra formação, constituinte da Serra dos Candeeiros. As amostras 1 e 2 resultaram de escavações realizadas no âmbito de terraplenagens associadas à construção de uma autoestrada, enquanto a amostra 3 foi extraída de uma pedreira na zona de Rio Maior. Os autores não referem se as amostras de calcário se apresentavam alteradas.

Na tabela 2.50 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados, entre os quais os resultados do ensaio de DMA que decorreu em conformidade com as recomendações propostas pela ISRM (1977).

**Tabela 2.50** Resultados dos ensaios de caracterização mecânica com amostras de calcário (adaptado de Conde *et al.*, 2004)

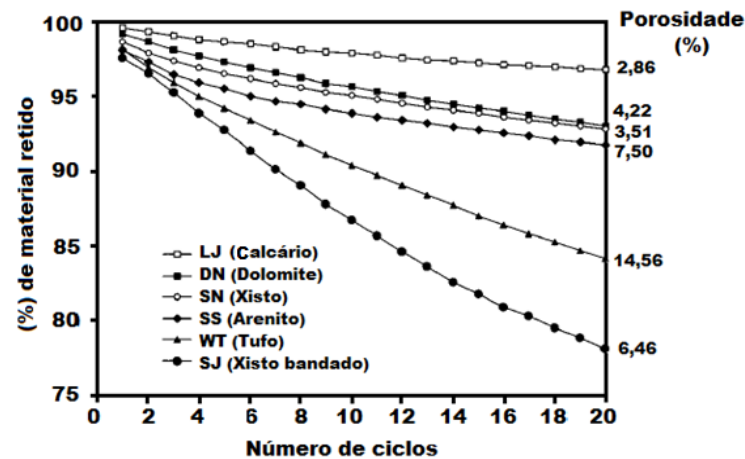
Ensaio	Parâmetro	Valor obtido		
		Calcário 1	Calcário 2	Calcário 3
<b>Compressão uniaxial</b>	$\sigma_c$ (MPa)	111,5	79,1	84,5
<b>Carga pontual</b>	$I_{5(50)}$	5,34	4,17	5,55
<b>Brasileiro</b>	$\sigma_t$ (MPa)	9,58	6,85	6,73
<b>DMA</b>	$I_{d2}$ (%)	99,4	98,3	99,4
<b>Martelo de Schmidt</b>	Índice de Schmidt	38,0	43,0	47,0

Os calcários ensaiados, sob o ponto de vista da durabilidade, apresentaram-se muito competentes, dado pertencerem à categoria dos materiais de durabilidade muito elevada pela classificação de Gamble (*op. cit.*).

#### 2.5.7.2.3 - Dhakal *et al.* (2004)

Com vista à avaliação da durabilidade de alguns materiais rochosos, como calcários, arenitos e xistos, Dhakal *et al.* (2004) procederam à realização de ensaios de DMA. Os calcários, provenientes de Shiriya, Honshu (Japão), apresentavam uma tonalidade cinzenta, sendo constituídos essencialmente por calcite, entre 90% e 95%. Os ensaios de DMA foram realizados em conformidade com as recomendações propostas pela ISRM (*op. cit.*), com exceção no número de ciclos de desgaste, dado que foram realizados um total de 20 ciclos, cada um com a duração de 10 min e à velocidade de 20 rpm.

Na figura 2.20 apresentam-se os resultados dos ensaios para todas as amostras.



**Figura 2.20** Resultados dos ensaios de DMA para os diferentes tipos de rocha estudadas (adaptado de Dhakal *et al.*, 2004)

No caso dos calcários, os resultados demonstraram que com o aumento do número de ciclos de desgaste, as perdas de material tornaram-se cada vez menos significativas. Em comparação com os restantes materiais ensaiados, os calcários apresentaram-se menos suscetíveis ao desgaste e à desintegração, sendo classificados como materiais de durabilidade elevada a muito elevada, considerando a classificação proposta por Gamble (1971).

#### 2.5.7.2.4 - Kolay e Kayabali (2006)

Kolay e Kayabali (2006), com o objetivo de avaliar a influência da forma e da rugosidade da superfície dos provetes sobre o  $I_d$ , adaptaram o método proposto pela ISRM (1977) à realização do programa de investigação definido. Para o efeito, executaram quatro ciclos de desgaste em provetes com três formas diferentes: angular, subangular e arredondada. O material amostrado era um calcário argiloso, de tonalidade branca a cinza clara, e constituído essencialmente por calcite, minerais argilosos e restos de fósseis.

Na tabela 2.51 apresentam-se os resultados dos ensaios de DMA para as três formas ensaiadas.

Os resultados obtidos evidenciaram que a forma dos provetes teve maior influência na durabilidade dos Calcários 2 que na dos Calcários 1 e que o aumento do número de ciclos de desgaste também influenciou mais a durabilidade dos Calcários 2 que a dos Calcários 1. Tomando como referência os valores obtidos para  $I_{d2}$  e tendo em consideração a classificação proposta por Gamble (*op. cit.*), verifica-se que nos Calcários 1 apenas os provetes com formas arredondadas apresentam durabilidade elevada, sendo a durabilidade dos restantes média a elevada. No caso dos Calcários 2 a durabilidade é média nas formas Subangular 1 e Angular 1 e média a elevada nas restantes.

**Tabela 2.51** Resultados dos ensaios de DMA em função das formas dos provetes (adaptado de Kolay e Kayabali, 2006)

Tipo de rocha	Forma	Índice de durabilidade			
		$I_{d1}$ (%)	$I_{d2}$ (%)	$I_{d3}$ (%)	$I_{d4}$ (%)
<b>Calcário 1</b>	Arredondada 1	97,6	96,1	95,0	93,9
	Arredondada 2	98,7	96,3	95,6	93,7
	Subangular 1	95,4	90,4	88,7	83,0
	Subangular 2	97,0	92,0	90,9	87,1
	Angular 1	98,6	94,7	94,3	90,4
	Angular 2	96,8	94,8	93,4	91,9
<b>Calcário 2</b>	Arredondada 1	96,6	93,1	90,2	87,0
	Arredondada 2	97,2	91,4	86,9	84,4
	Subangular 1	87,6	84,2	81,7	79,6
	Subangular 2	95,5	90,9	87,3	84,3
	Angular 1	85,3	82,2	79,6	77,6
	Angular 2	92,7	89,2	86,3	84,2

Legenda:  $I_{d3}$  - Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do terceiro ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio;  $I_{d4}$  - Valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do quarto ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio

## 2.6 - Notas finais

No capítulo 2 foram abordadas cinco áreas temáticas principais: políticas de gestão integrada de resíduos; regulamentação técnica sobre resíduos, com enfoque nos RCD e nas escórias de aciaria de FAE; caracterização dos aterros de resíduos e dos dois resíduos selecionados; e durabilidade dos materiais. Nesta secção resumem-se as informações mais relevantes tratadas em cada área temática.

- i. A DQR (Diretiva 2008/98/CE), publicada pelos PCE e transposta para a ordem jurídica interna pelo DL n° 73/2011, operou uma mudança acentuada na linha de pensamento seguida até então pelos estados-membros da UE, ao passar de uma política focalizada na opção por eliminar resíduos para uma que fomenta a reutilização e a reciclagem dos resíduos com vista a prolongar o seu uso na economia, tendo presente a preservação dos recursos naturais.
- ii. A produção anual dos RCD, significativamente superior à dos restantes resíduos, e as particularidades do fluxo daqueles resíduos, que dificultam a sua gestão, justificaram, entre outras razões, a necessidade de criar um regime jurídico próprio que estabelecesse normas técnicas relativas às operações de gestão de RCD, o qual ficou consagrado com a publicação do DL n° 46/2008. No caso das escórias de aciaria de FAE não existe legislação específica na ordem jurídica interna, pelo que as operações da sua gestão são reguladas em concordância com o previsto no RGPPGR.
- iii. A inexistência de legislação comunitária para regulamentar a gestão do fluxo de RCD e das escórias de aciaria de FAE produzidas em espaço europeu é colmatada em alguns estados-membros da EU com a implementação de medidas e de instrumentos legais, com o propósito de prevenir a sua produção e promover o seu reaproveitamento.
- iv. A DPC (Diretiva 93/68/CEE), transposta para a ordem jurídica interna através do DL n° 113/93, de 10 de abril, e revogada pelo regulamento (UE) n° 305/2011, que visa

diretamente os produtos de construção destinados a serem incorporados de modo permanente em obras de engenharia civil e aos quais diz respeito uma ou mais exigências essenciais, passou a contemplar os agregados reciclados. Na sequência da DPC foi emitido o mandato M/125 pela CEE, para que fossem elaboradas pelo CEN normas de produtos e de ensaios.

- v. O DL nº 183/2009, que estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais a observar nas diferentes fases da obra, requer a utilização de material mineral natural isento de calcário na camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de proteção basal ativo dos aterros de resíduos, havendo até à data insuficiente suporte experimental e teórico para viabilizar a utilização de agregados reciclados.
- vi. Os RCD são resíduos compostos maioritariamente por material inerte e a produção anual significativamente superior à dos restantes resíduos justifica a procura de soluções para a sua valorização, que em engenharia civil está associada, na sua generalidade, à construção de pavimentos rodoviários e à produção de betões e argamassas.
- vii. As escórias de aciaria de FAE processadas são um agregado reciclado comercializado em Portugal pela SN com a designação de ASIC. A sua valorização está associada, na sua generalidade, à construção de pavimentos rodoviários. A aplicação em estruturas de drenagem de infraestruturas rodoviárias pode resultar na formação de tufa (uma forma de carbonato de cálcio precipitado), prejudicando o seu adequado funcionamento.
- viii. A utilização e o comportamento dos agregados naturais em obras de engenharia civil encontram-se extensamente estudados e documentados, designadamente no que se refere à sua durabilidade, em contraposto ao verificado em relação aos agregados reciclados, que só recentemente começaram a ser valorizados como materiais de construção.





## 3 - ESTUDO EXPERIMENTAL

### 3.1 - Considerações iniciais

A revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior evidenciou que os estudos efetuados para promoverem a valorização dos dois agregados reciclados selecionados para este trabalho, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, que resultam, respetivamente, do processamento de RCD e de escórias de aciaria de FAE, privilegiaram as aplicações em pavimentos rodoviários e em aterros estruturais, entre outras, e que nesses estudos a avaliação da durabilidade e da permeabilidade dos materiais não foi efetuada ou relevante. Entendeu-se, por isso, que seria importante e oportuno implementar um programa experimental que estudasse a durabilidade e a permeabilidade do AB<sub>RCD</sub> e do ASIC, tendo em vista a sua utilização na construção de estruturas de drenagem de infraestruturas de transporte e de obras geotécnicas, e em particular na camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos. Neste trabalho é apresentado o estudo da durabilidade dos materiais, ficando para outra dissertação, a avaliação do comportamento hidráulico dos mesmos.

Dada a já mencionada falta de dados sobre a durabilidade dos dois agregados reciclados selecionados, também se entendeu relevante utilizar no presente estudo dois agregados naturais, o basalto e o calcário, relativamente aos quais existem estudos e experiência sobre o seu comportamento em obra, o que permite utilizá-los como referência ao desempenho do AB<sub>RCD</sub> e do ASIC. O estudo do calcário tem ainda o interesse adicional de a legislação em vigor, o DL nº 183/2009, não permitir a utilização de brita calcária na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos. Os resultados do estudo podem assim confirmá-la ou vir a viabilizar a utilização de brita calcária.

Na secção 3.2 apresentam-se os quatro materiais granulares britados selecionados, o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC, o basalto e o calcário, bem como um dos meios aquosos, o lixiviado - L, sendo o outro meio aquoso, a água da rede de abastecimento público - A. Na mesma secção descreve-se o procedimento adotado na amostragem e no armazenamento dos materiais.

A metodologia e os equipamentos utilizados na análise petrográfica (macro e micro), na caracterização física ( $M_{VR}$ ,  $M_{VA}$ ,  $P_e$  e  $w_{max}$ ) e na determinação da durabilidade, são apresentados na secção 3.3, incluindo as técnicas adotadas na preparação dos provetes e na acidificação do lixiviado.

A secção 3.4 apresenta e analisa os resultados provenientes da caracterização laboratorial, que no caso da análise petrográfica e da caracterização física foi efetuada antes e após os ensaios para a avaliação da durabilidade. No final da secção efetua-se uma análise comparativa da durabilidade dos materiais estudados com base nos resultados obtidos e nos dados recolhidos na bibliografia para agregados naturais de idêntica litologia aos estudados.

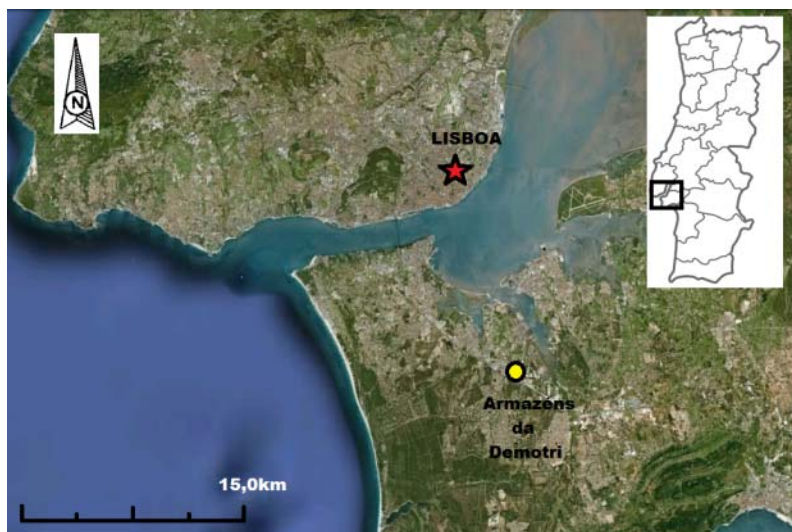
Por último, na secção 3.5 apresentam-se as principais conclusões do estudo da durabilidade dos dois agregados reciclados e dos dois agregados naturais com as técnicas laboratoriais utilizadas.

## 3.2 - Materiais

### 3.2.1 - AB<sub>RCD</sub>

#### 3.2.1.1 - Localização geográfica

O agregado reciclado AB<sub>RCD</sub> é produzido pela Demotri, S.A., entidade responsável pela área das demolições do Grupo Ambigroup, a partir do processamento de RCD de diversas obras de demolição numa central de reciclagem. A central e os armazéns da Demotri, de onde foi recolhida a amostra de AB<sub>RCD</sub>, localizam-se na região de Lisboa e Vale do Tejo, concelho de Seixal, freguesia da Arrentela, a cerca de 22 km da cidade de Lisboa (figura 3.1). As povoações mais próximas na envolvente da localidade da Arrentela são: o Seixal, a norte; o Fogueteiro, a sudoeste; e a Torre de Marinha, a sudeste. A região encontra-se coberta pela Folha nº 442, intitulada “Barreiro”, da carta militar de Portugal, à escala 1:25000, publicada em 2009 pelo Instituto Geográfico do Exército - IGE.



**Figura 3.1** Localização geográfica dos armazéns da Demotri, com as coordenadas seguintes: 38°36'14.71"N; 9°05'04.63"O (adaptado de extrato do “Google earth” de 26/06/2012)

O acesso rodoviário principal aos armazéns da Demotri é pela autoestrada A2, Lisboa-Algarve, à qual se segue a estrada nacional 10, N10, direção às localidades de Setúbal/Azeitão. A par destes itinerários principais, a região onde se situam os armazéns da Demotri é ainda cruzada por uma série de estradas municipais que permitem a ligação aos eixos rodoviários anteriormente mencionados e às localidades que se encontram na sua envolvente.

#### 3.2.1.2 - Processamento

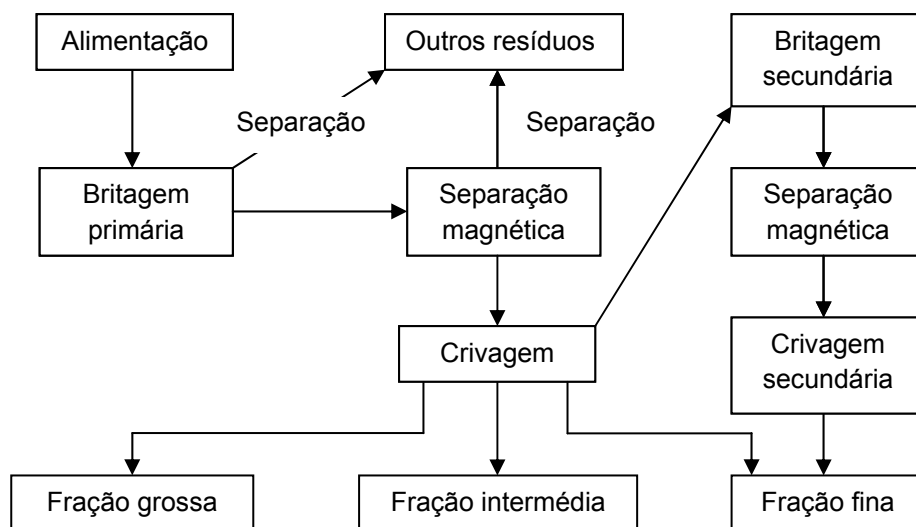
O processamento dos RCD utilizados no presente estudo foi realizado numa central de reciclagem da Demotri a partir de betão proveniente de obras de demolição seletiva (temática já abordada na secção 2.4.1.2) e envolveu as cinco etapas seguintes:

- a. fragmentação preliminar do betão;
- b. triagem;
- c. transporte;
- d. britagem;
- e. armazenamento temporário da fração inerte.

Concluído o processo de demolição seletiva das infraestruturas demolidas, os resíduos daí resultantes são maioritariamente materiais inertes, entre os quais o betão armado. No local da obra, procede-se à primeira etapa do processamento dos RCD de betão, particularmente importante para a qualidade dos agregados reciclados resultantes. A fração metálica resultante das armaduras do betão é removida por pulverização preliminar do betão com recurso a demolidor e os blocos de betão fragmentados até dimensões adequadas ao processo de britagem a realizar na unidade de britagem da central de reciclagem. No caso de haver necessidade de transporte do material para uma unidade de britagem, a dimensão destes blocos deve ser a adequada à sua realização.

Ainda no local da obra, a extração do ferro é acompanhada de outras operações de triagem (segunda etapa), como seja a remoção dos materiais biodegradáveis (p. ex.: madeira; papel; e cartão, entre outros) e de outros materiais (p. ex.: solos; e sucata), de modo a que a quantidade destes no material a transportar para a unidade de britagem seja a menor possível.

Na terceira etapa, o betão é transportado até à central de reciclagem, sendo depois armazenado temporariamente em pilhas para posterior britagem e classificação granulométrica. O processo de britagem (quarta etapa) é apresentado esquematicamente na figura 3.2 e ilustrado na figura 3.3. Trata-se de equipamentos correntes de britagem (p. ex. britadeira de maxilas), que processam a separação magnética do aço existente na armadura do betão com recurso a eletroímã (figura 3.3b) e a classificação granulométrica do material através de tremonha de abertura regulável (figura 3.3c).



**Figura 3.2** Esquematização da quarta etapa do processamento dos RCD (adaptado de Almeida, 2011)



**Figura 3.3** Exemplos do equipamento utilizado durante a quarta etapa de processamento dos RCD: a) britagem; b) separação magnética; c) crivagem (adaptado de Algarvio, 2009)

Os agregados reciclados, depois de classificados em diferentes classes granulométricas, de modo a contemplarem as diversas necessidades de aplicação, são armazenados em parques (quinta etapa), ao ar livre (figura 3.4) ou em áreas cobertas, em função da sua origem e dos seus constituintes, evitando-se assim a mistura de materiais com características distintas. No armazenamento devem ser respeitados os critérios de segurança do empilhamento, em particular da instabilidade ao deslizamento, e os critérios ambientais, de forma a reduzir ao mínimo eventuais impactes negativos.



**Figura 3.4** Armazenamento dos RCD-R no parque (adaptado de Almeida, 2011)

A granulometria dos agregados reciclados produzidos da britagem do betão na unidade da Demotri varia entre 0 mm e 56 mm.

### 3.2.1.3 - Amostragem

O processo de amostragem do AB<sub>RCD</sub> no parque da Demotri decorreu de forma empírica, por se considerar que a qualidade e a representatividade da amostra recolhida não eram prejudicadas por não se seguir a totalidade das recomendações propostas nos documentos técnicos consultados, designadamente os relatórios técnicos “*Technical Reports*” - TR do CEN (CEN/TR 15310 (2006)). Os principais motivos que contribuíram para se seguir a metodologia adotada foram: (1) a natureza do material amostrado; (2) as condições do local da amostragem; (3) o modo como o material se encontrava armazenado; e (4) os condicionalismos inerentes aos ensaios de DMA realizados no presente estudo, nomeadamente a dimensão e a forma dos provetes a preparar a partir da amostra recolhida.

A tabela 3.1 representa uma folha de registo, adaptada da norma ASTM D4687 (1995), onde consta a informação mais relevante do processo de amostragem do AB<sub>RCD</sub>. Alguma dessa informação é complementada visualmente pela figura 3.5.

**Tabela 3.1** Registo do processo de amostragem do AB<sub>RCD</sub>

<b>Nome da empresa</b>	Demotri, S.A. (Grupo Ambigroup).	<b>Data da recolha</b>	07/04/2011
<b>Localização da infraestrutura</b>	Parque Seixal/Casal do Marco - freguesia da Arrentela.	<b>Hora da recolha</b>	14h30
<b>Tipo de procedimento para a produção do material</b>	Descrito na secção 3.2.1.2.	<b>Tipo de material</b>	Agregado reciclado.
<b>Descrição visual do material</b>	Material constituído por agregados naturais de duas dimensões, grossos e finos, envolvidos por uma matriz cimentícia e porosa, e de forma irregular em virtude do processo de britagem.		
<b>Descrição do depósito de armazenamento do material</b>	O material encontrava-se depositado numa pilha a céu aberto (figura 3.5a), sem proteção contra agentes externos, nomeadamente os atmosféricos. A pilha do material recolhido tinha cerca de 2 m de altura e 5 m de comprimento.		
<b>Composição química do material</b>	Sem informação.		
<b>Número de blocos recolhidos</b>	120 blocos de dimensões inferiores a 100 mm.	<b>Peso total</b>	Sem informação.
<b>Recipiente de recolha</b>	5 sacos em nylon.		
<b>Finalidade da amostragem</b>	Avaliação da suscetibilidade à degradação por intermédio da realização de ensaios de DMA, com vista à avaliação da sua adequabilidade para a construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos.		
<b>Método de amostragem</b>	Manual, sem recurso a qualquer tipo de equipamento de amostragem (figura 3.5b). Os critérios para a seleção das amostras foram estabelecidos em função das restrições impostas pelos ensaios de DMA. Como tal, os blocos selecionados apresentavam dimensões inferiores a 100 mm e uma forma preferencialmente quadrangular, para facilitar a execução dos provetes necessários à realização daqueles ensaios.		
<b>Tipo de preservação</b>	Os blocos foram transportados nos sacos em nylon para o LNEC, mantendo-se nos mesmos, à temperatura ambiente, até serem encaminhados para a máquina de corte com vista à preparação dos provetes.		
<b>Parâmetros avaliados in situ</b>	Sem informação.		
<b>Observações suplementares</b>	Sem informação.		



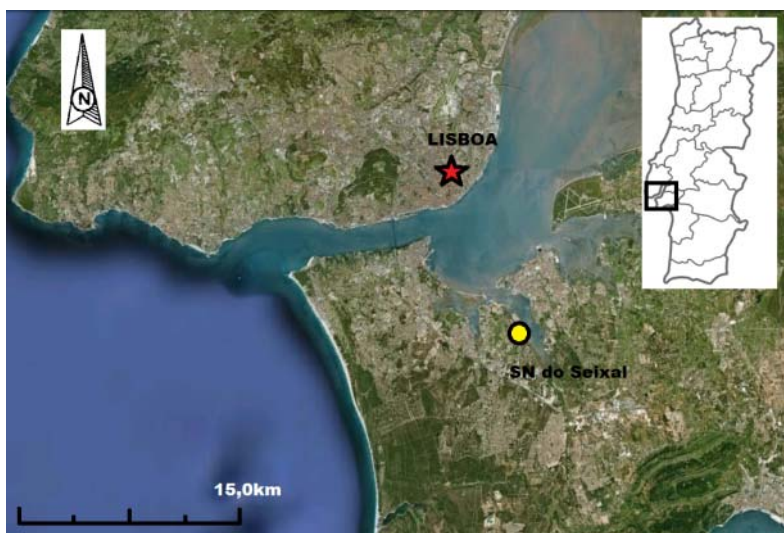


**Figura 3.5** Amostragem do  $AB_{RCD}$ : a) pilha de material existente na central de reciclagem da Demotri no seixal; b) recolha da amostra

### 3.2.2 - ASIC

#### 3.2.2.1 - Localização geográfica

O agregado reciclado ASIC tem origem no processamento das escórias de aciaria de FAE produzidas na unidade industrial da SN do Seixal. Esta unidade localiza-se na região de Lisboa e Vale do Tejo, concelho do Seixal, freguesia de Aldeia de Paio Pires, a cerca de 24 km da cidade de Lisboa (figura 3.6). As povoações na envolvente da localidade da Aldeia de Paio Pires são as seguintes: o Barreiro, a norte; o Seixal, a noroeste; e a Arrentela, a oeste. A região encontra-se coberta pela Folha nº 442, denominada “Barreiro”, da carta militar de Portugal, à escala 1:25000, publicada em 2009 pelo IGE.



**Figura 3.6** Localização geográfica da SN do Seixal, com as coordenadas seguintes: 38°37'43.37"N; 9°04'50.19"O (adaptado de extrato do “Google earth” de 26/06/2012)

O acesso rodoviário principal à unidade industrial da SN do Seixal é primeiramente pela autoestrada A2, Lisboa-Algarve, à qual se segue a N10, direção Seixal/Fogueteiro. A região onde se

situa a SN do Seixal é, ainda, cruzada por uma série de estradas municipais que permitem a ligação aos eixos rodoviários já mencionados e entre as localidades mais próximas.

### 3.2.2.2 - *Processamento*

O processamento das escórias de aciaria de FAE produzidas na SN do Seixal tendo em vista a sua valorização como agregado reciclado decorre após o vazamento destas para um fosso (figura 3.7) no final do período de oxidação do processo de produção de aço, e, de acordo com Roque *et al.* (2006), engloba as seis etapas seguintes:

- a. arrefecimento primário;
- b. arrefecimento secundário;
- c. fragmentação;
- d. eliminação das componentes metálicas;
- e. britagem; e
- f. maturação final para a neutralização da cal livre remanescente.

Os mesmos autores referem, contudo, que estas etapas podem ser agrupadas em três fases, com o escoamento e o arrefecimento da escória a decorrerem na primeira fase, e a separação da componente metálica ainda existente nas escórias e as ações necessárias à valorização da sua parte não metálica a decorrem nas últimas duas fases.



**Figura 3.7** Vazamento das escórias para um fosso (adaptado de Roque *et al.*, 2006)

A primeira fase do processamento das escórias de aciaria de FAE tem início com a sua transferência do fosso para uma zona de arrefecimento primário (figura 3.8a). A base desta zona encontra-se devidamente impermeabilizada, de modo a evitar a poluição do terreno e dos recursos hídricos locais, e equipada com um sistema de drenagem que permite o encaminhamento das águas do arrefecimento para um local adequado.

As escórias são, posteriormente, transportadas para uma zona destinada à continuação do seu arrefecimento, com recurso a água, quando se pretende acelerar o processo, ou aguardando-se o tempo necessário para que este decorra naturalmente (figura 3.8b).



**Figura 3.8** a) Arrefecimento primário das escórias na zona impermeabilizada; b) arrefecimento secundário (adaptado de Roque *et al.*, 2006)

A expansibilidade das escórias de aciaria de FAE, propriedade associada à presença de cal e de  $MgO$  na forma livre, é um dos principais fatores limitativos para a sua valorização em obras de engenharia civil, sobretudo na construção de infraestruturas rodoviárias, conforme já mencionado na secção 2.4.2.5.3. É neste contexto que o período de arrefecimento secundário assume um papel primordial na promoção da completa hidratação e carbonatação da cal e do  $MgO$ .

O resíduo resultante desta fase de processamento, arrefecimento primário e secundário, na LER é denominado “escórias não processadas” e catalogado no capítulo 10 com o código 10 02 02, conforme já referido na secção 2.4.2.3.

Na segunda fase procede-se, primeiramente, à fragmentação das placas de escória de aciaria de FAE formadas durante o seu arrefecimento (figura 3.9a), com remoção das partes metálicas de maiores dimensões através de meios de manipulação física. A escória resultante alimenta a tremonha do britador, a que se segue a sua britagem e separação das partes metálica (figura 3.9b), reciclada durante a produção do aço, e não metálica, por intermédio de tambores magnéticos.

Na escória de aciaria resultante passa apenas a existir aparas menores e em quantidades reduzidas, que na LER são classificadas com o código 10 02 01 e têm a denominação “resíduos do processamento de escórias” (Roque *et al.*, 2006).



**Figura 3.9** a) Fragmentação; b) parte metálica obtida da separação das partes metálicas e não metálicas, a reutilizar na produção do aço (adaptado de Roque *et al.*, 2006)



Na fase final do processamento das escórias de aciaria de FAE são realizadas as etapas seguintes com vista à valorização da sua parte não metálica:

- a. separação por peneiração/calibração em frações granulométricas (figura 3.10) adequadas às diversas aplicações do material na construção;
- b. refragmentação mecânica, com eventual moagem, para produzir maior percentagem de finos, e assim obter granulometrias mais finas;
- c. eliminação das aparas metálicas de menores dimensões que não foram eliminadas nas fases anteriores, através de passagem com prato magnético e/ou reprocessamento, passando novamente o material no rolo magnético; e
- d. armazenamento e maturação por hidratação ao ar livre, no tempo necessário à neutralização da cal livre remanescente.

O produto final do processamento da parte não metálica, em Portugal, é denominado comercialmente por ASIC.



**Figura 3.10** Peneiração em frações granulométricas

É de referir que o conjunto de medidas para a valorização das escórias de aciaria de FAE não se restringe apenas às expostas na presente secção. Ao longo dos anos foram-se desenvolvendo diferentes métodos/técnicas, sendo que cada siderurgia, em cada país, opta pelo método que melhor se adequa às suas pretensões e/ou às suas possibilidades em função de vários fatores, tais como: os aspetos operacionais; os prazos de entrega; ou os requisitos inerentes às propriedades das escórias (Puy, 2007; Shen *et al.*, 2009 in Wang *et al.*, 2010).

### **3.2.2.3 - Amostragem**

O processo de amostragem do ASIC nas instalações da SN do Seixal decorreu, no essencial, conforme o descrito na secção 3.2.1.3. Na tabela 3.2 são apresentados os elementos mais importantes do processo de amostragem do ASIC, sendo alguma dessa informação complementada pelo mostrado na figura 3.11.

**Tabela 3.2** Registo do processo de amostragem do ASIC

<b>Nome da empresa</b>	SN	<b>Data da recolha</b>	30/03/2011
<b>Localização da infraestrutura</b>	Avenida Siderurgia Nacional - freguesia da Aldeia de Paio Pires.	<b>Hora da recolha</b>	16h30
<b>Tipo de procedimento para a produção do material</b>	Descrito na secção 3.2.2.2.	<b>Tipo de material</b>	Agregado reciclado.
<b>Descrição visual do material</b>	Material denso, de tonalidade escura (negra), textura vesicular e superfície áspera, irregular e cortante. Em algumas amostras de ASIC era visível, a olho nu, a inclusão de pequenas partículas de ferro.		
<b>Descrição do depósito de armazenamento do material</b>	O material amostrado encontrava-se depositado em várias pilhas, a céu aberto (figura 3.11a), sem proteção contra agentes externos, em particular os atmosféricos. A pilha de onde o material foi recolhido tinha entre 3 m e 5 m de altura e uma extensão superior a 10 m.		
<b>Composição química do material</b>	Não foi avaliada, mas a informação pode ser consultada na tabela 2.36 da secção 2.4.2.5.2.		
<b>Número de blocos recolhidos</b>	200 blocos de dimensões inferiores a 100 mm.	<b>Peso total</b>	Sem informação.
<b>Recipiente de recolha</b>	2 sacos grandes em plástico.		
<b>Finalidade da amostragem</b>	Ver tabela 3.1.		
<b>Método de amostragem</b>	Ver tabela 3.1.		
<b>Tipo de preservação</b>	Ver tabela 3.1.		
<b>Parâmetros avaliados in situ</b>	Sem informação.		
<b>Observações suplementares</b>	Sem informação.		



a)



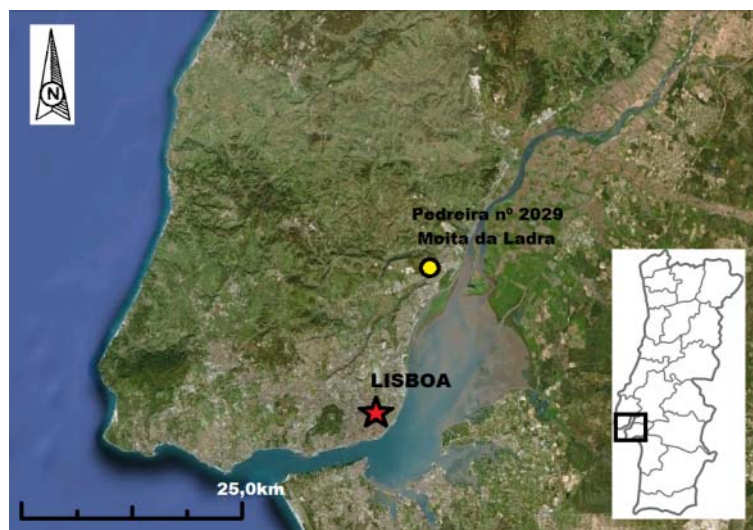
b)

**Figura 3.11** Amostragem do ASIC: a) pilha de material existente no parque de armazenamento da SN do Seixal; b) recolha da amostra

### 3.2.3 - Basalto

#### 3.2.3.1 - Localização geográfica

O basalto estudado foi recolhido na Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra, da empresa Alves Ribeiro, S.A.. A exploração situa-se na região de Lisboa e Vale do Tejo, entre as povoações de Verdelha, a este, de Boca da Lapa, a sul, e de Vialonga, a sudoeste, a uma distância aproximada de 25 km da cidade de Lisboa (figura 3.12). A região encontra-se coberta pela Folha nº 403, intitulada "Bucelas: Loures", da carta militar de Portugal, à escala 1:25000, publicada em 1993 pelo IGE.



**Figura 3.12** Localização geográfica da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra, com as coordenadas seguintes: 38°53'17.73"N; 9°04'02.48"O (adaptado de extrato do "Google earth" de 26/06/2012)

O acesso rodoviário principal à Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra é pela autoestrada A1, sentido Lisboa-Porto, ao qual se segue a N10, direção Alverca/Alhandra, e a estrada municipal M501, direção Vialonga/Bucelas. A aproximação à pedreira é feita por caminhos municipais secundários pavimentados até à povoação de Boca da Lapa, seguindo-se depois por caminhos de terra batida.

### **3.2.3.2 - Enquadramento geológico**

A Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra insere-se numa região em que, do ponto de vista geomorfológico, se distinguem três unidades: (1) a planície aluvionar do Tejo; (2) os afloramentos terciários; e (3) os terrenos da "Orla Mesocenozóica Ocidental" (Plural, 2004).

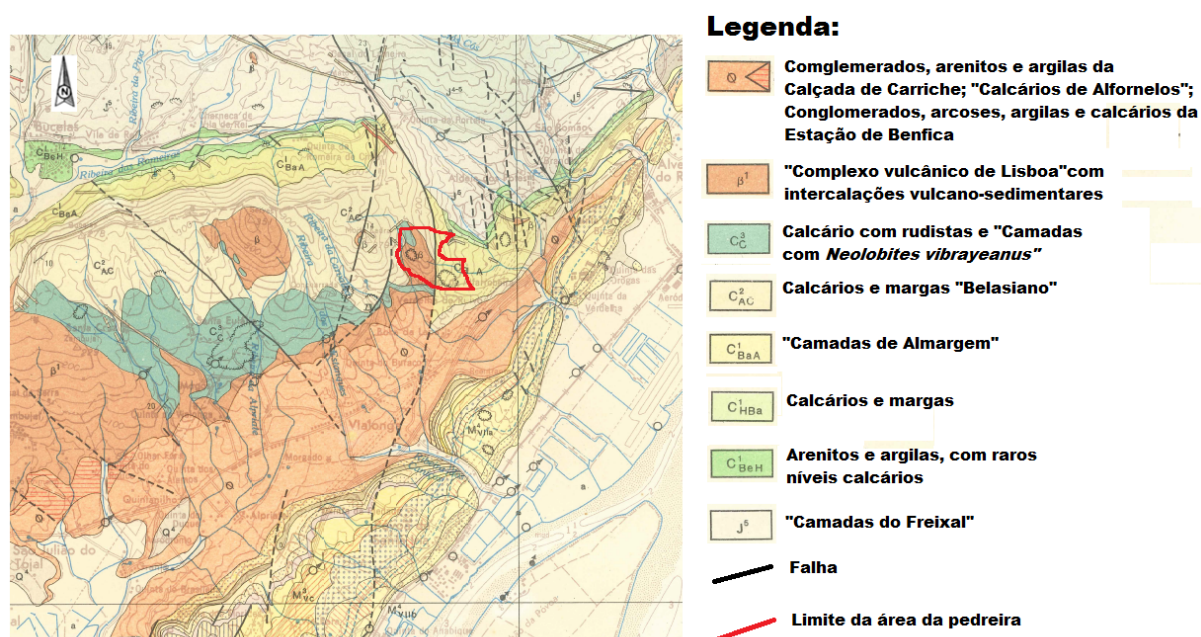
As principais estruturas tectónicas na região são o sinclinal do Tejo, com orientação NE-SW e o *horst* Jurássico de Alhandra e Vila Franca de Xira, que resulta de um cavalgamento do Miocénico sobre o Jurássico. "Esta última unidade estrutural é cortada por numerosas falhas que podem ser agrupadas nas famílias seguintes: acidentes de orientação NE-SW, paralelos ao Tejo, de entre os quais se distingue a falha de Santa Iria e a falha que passa por Cardosas e Cachoeiras; e acidentes de orientação NW-SE, como p. ex. as falhas de Alhandra e de Alverca" (*ibid.*).

A "Orla Mesocenozóica Ocidental", onde se insere o "Complexo Basáltico de Lisboa" e por essa razão detalhada nalguns aspetos em seguida, corresponde a uma bacia sedimentar, designada "Bacia Lusitaniana", que se começou a diferenciar no Triásico. Esta bacia apresenta orientação geral NNE-SSW, largura de cerca de 100 km e uma extensão de cerca de 250 km (*ibid.*), e várias sequências deposicionais de sedimentos que resultam de sucessivos episódios regressivos e transgressivos com uma espessura total de cerca de 4 km. Dados de prospeção sísmica recolhidos a norte de Lisboa revelaram, contudo, que a Bacia Lusitaniana é composta por várias sub-bacias (*ibid.*).

A evolução da geologia da região prosseguiu com eventos magmáticos no final do Cretácico, responsáveis pela instalação do "Complexo Basáltico de Lisboa", donde provém o basalto amostrado. Este maciço basáltico "(...) é constituído por uma sucessão de derrames lávicos, separados por

vários níveis de materiais piroclásticos (brechas e cinzas, entre outros), por algumas camadas sedimentares (conglomerados e argilas, entre outros), contendo por vezes moluscos terrestres (...), “(...) e por alguns restos de vertebrados indetermináveis” (Zbyszewski, 1964). “O maciço basáltico assenta indiferentemente sobre o Turoniano ou sobre o Cenomaniano, com uma espessura variável de ponto para ponto” (*ibid.*). A maior espessura, de 400 m, está localizada entre as localidades de Caneças e de Odivelas (*ibid.*).

O enquadramento geológico da região onde se insere o maciço basáltico é mostrado na figura 3.13 sobre um extrato da Folha 34-B da carta geológica de Portugal, à escala 1:50000, publicada em 2008 pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação - INETI, o atual LNEG.



**Figura 3.13** Enquadramento geológico da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra (adaptado da carta geológica de Portugal, à escala 1:50000, Folha 34-B, "Loures")

### 3.2.3.3 - Processamento

O ciclo de produção da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra, envolve um conjunto de operações sequenciais que se traduzem nas etapas seguintes:

- a. desmatagem e decapagem;
- b. desmonte - exploração;
- c. carga;
- d. transporte;
- e. tratamento - britagem; e
- f. expedição.

A fase de exploração inclui um conjunto de operações executadas de modo a otimizar a extração do recurso natural. A desmatagem da vegetação efetua-se de modo faseado, à medida das



necessidades da escavação, sendo seguida da decapagem dos terrenos virgens. Após a "limpeza" dos terrenos de cobertura superficiais passa-se à exploração do maciço rochoso com esta a decorrer mediante a utilização de explosivos. Primeiramente são escavados os degraus superiores, a partir dos degraus já existentes. Este processo é executado de forma faseada, visando racionalizar o aproveitamento do basalto em termos técnico-económicos e minimizar os impactes visuais decorrentes da atividade extrativa.

Na figura 3.14 apresenta-se a atual frente de exploração da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra.



**Figura 3.14** Frente de exploração da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra: a) vista geral; b) vista de detalhe

Concluída a etapa de desmonte, o basalto extraído é transportado para a central de processamento, onde é primeiramente sujeito a uma pré-britagem, sendo de seguida processado numa unidade de britagem (figura 3.15a), com o produto final a ser classificado nas seis granulometrias seguintes: (1) balastro, 25 mm - 50 mm; (2) brita 3, 12 mm - 20 mm; (3) brita 2, 10 mm - 16 mm (figura 3.15b); (4) brita 1, 4 mm - 12 mm; (5) bago de arroz, 2 mm - 6 mm; (6) e areão, 0 mm - 4 mm. A unidade de britagem é totalmente automatizada, o que resulta num aumento de capacidade do circuito e numa redução dos gastos de energia.



**Figura 3.15** a) Unidade de britagem com seis silos; b) brita 2, 10 mm - 16 mm

A fase final do ciclo de produção assume a denominação “expedição” (etapa 6), à qual corresponde o carregamento de camiões com o material armazenado.

### 3.2.3.4 - Amostragem

O processo de amostragem do basalto decorreu, no essencial, como descrito na secção 3.2.1.3. Na tabela 3.3 apresenta-se a folha de registo do processo de amostragem do basalto, com alguma da informação descrita a ser complementada pelo ilustrado na figura 3.16.

**Tabela 3.3** Registo do processo de amostragem do basalto

<b>Nome da empresa</b>	Alves Ribeiro, S.A.	<b>Data da recolha</b>	30/03/2011
<b>Localização da infraestrutura</b>	Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra - freguesia de Vialonga.	<b>Hora da recolha</b>	10h20
<b>Tipo de procedimento para a produção do material</b>	Descrito na secção 3.2.3.3.	<b>Tipo de material</b>	Rocha ígnea basáltica (agregado natural).
<b>Descrição visual do material</b>	Material denso, de tonalidade escura (negra), grão fino e forma irregular no final da pré-britagem.		
<b>Descrição do depósito de armazenamento do material</b>	O material encontrava-se depositado numa pilha a céu aberto (figura 3.16a), sem proteção contra agentes externos, em particular os atmosféricos. A pilha de onde o material foi recolhido tinha cerca de 10 m de altura e 25 m de extensão.		
<b>Composição química do material</b>	Sem informação.		
<b>Número de blocos recolhidos</b>	25 blocos de dimensões superiores a 100 mm.	<b>Peso total</b>	125 kg.
<b>Recipiente de recolha</b>	3 sacos em nylon (figura 3.16b).		
<b>Finalidade da amostragem</b>	Utilização do material como referência para a durabilidade dos agregados reciclados.		
<b>Método de amostragem</b>	Ver tabela 3.1.		
<b>Tipo de preservação</b>	Ver tabela 3.1.		
<b>Parâmetros avaliados in situ</b>	Sem Informação.		
<b>Observações suplementares</b>	Sem informação.		



a)



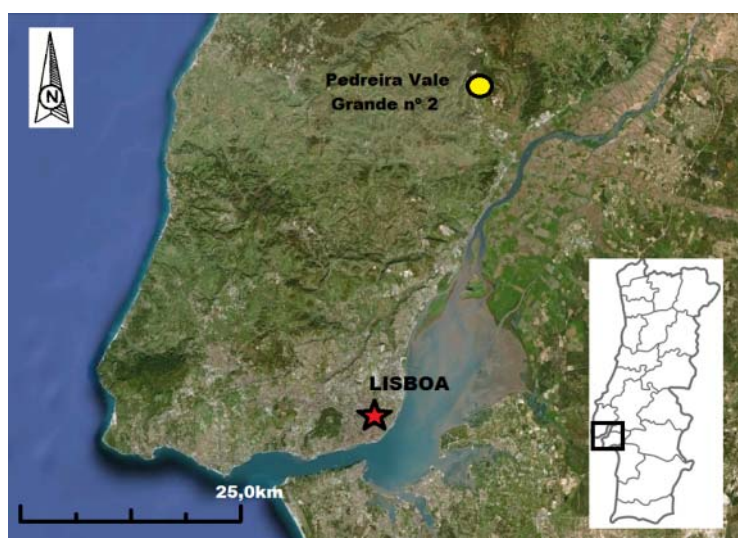
b)

**Figura 3.16** Amostragem do basalto: a) pilha de material pré-britado existente no parque de armazenamento da central de processamento da Pedreira nº 2029 - Moita da Ladra; b) recolha da amostra

### 3.2.4 - Calcário

#### 3.2.4.1 - Localização geográfica

O calcário estudado é produzido na Pedreira Vale Grande nº 2, pertencente à empresa Agrepor, S.A.. A exploração situa-se na região de Lisboa e Vale do Tejo, entre as povoações da Ota, a nordeste, da Meca, a oeste, do Porto de Luz, a sudoeste, e da Cheganças, a este, a cerca de 52 km da cidade de Lisboa (figura 3.17). A região encontra-se coberta pela Folha nº 376, denominada “Alenquer”, da carta militar de Portugal, à escala 1:25000, publicada em 1992 pelo IGE.



**Figura 3.17** Localização geográfica da Pedreira Vale Grande nº 2, com as coordenadas seguintes: 39°05'27.59"N; 9°01'03.29"O (adaptado de extrato do “Google earth” de 26/06/2012)

O acesso rodoviário principal é pela autoestrada A1, sentido Lisboa-Porto, ao qual se segue a N1, direção Alenquer. A aproximação à Pedreira Vale Grande nº 2 é feita pelas estradas municipais M 522 e M 518.

#### 3.2.4.2 - Enquadramento geológico

A Pedreira Vale Grande nº 2, de acordo com a informação facultada pela empresa Agrepor, situa-se no anticlinal da “Serra da Ota”, que pertence à já mencionada “Orla Mesocenozóica Ocidental” ou “Bacia Lusitaniana”. Este anticlinal, de natureza calcária, alongado segundo a direção N-S e com um comprimento aproximado de 8 km e uma largura de 2 km, encontra-se limitado a este e a oeste, respetivamente, pelos depósitos terrígenos do Terciário da região da Ota, do Vale do Paraíso e da Vila Nova da Rainha, e pelo sinclinal de Olhalvo.

Do ponto de vista estratigráfico, a pedreira pertence a uma extensa faixa de terrenos do “Jurássico Superior”, que se estendem para norte, oeste e sul ao longo de vários quilómetros. Estes terrenos são representados pela formação “Calcários de Ota” e pelo “Complexo Pteroceriano”, que incluem as camadas com “Lima pseudo-alternicosta”. Em algumas zonas, o carácter estratificado das



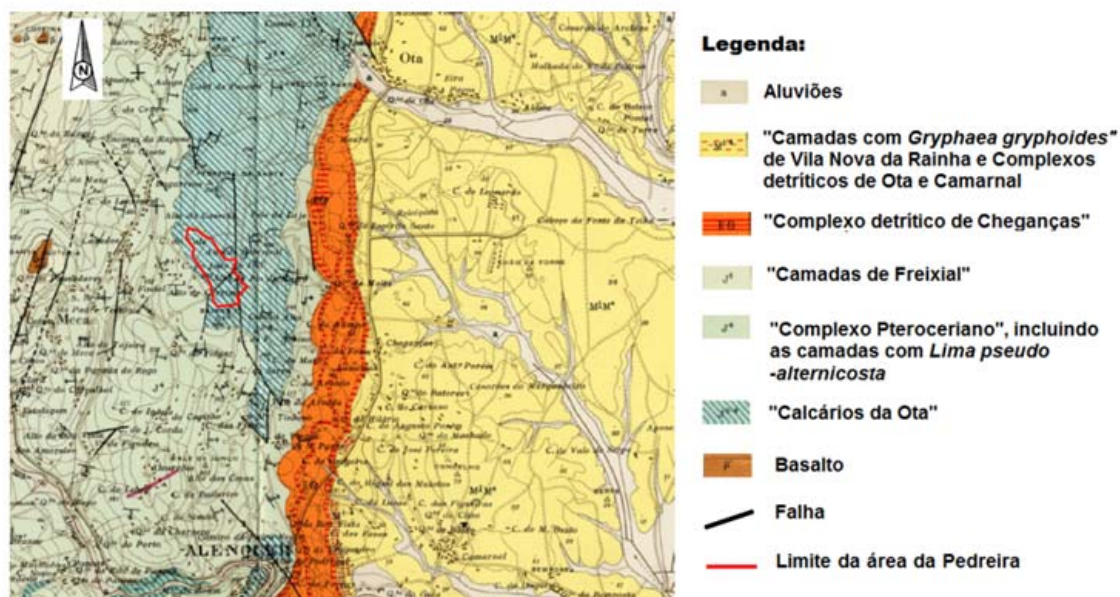
duas formações referidas desaparece por completo, sendo substituído por zonas de rocha esmagada, com matriz argilosa e tonalidade avermelhada.

A formação “Calcários de Ota” estende-se por um comprimento de cerca de 7 km e uma largura máxima de 2,5 km, e é constituída por um conjunto de bancadas de calcários cristalinos organo-detríticos, litoclásticos e oolíticos, por vezes, com matriz argilosa, bastante compactos, esbranquiçados, acinzentados e amarelados. A atitude média das camadas de calcário na zona da pedreira é de N20°W com uma inclinação de 15° para nordeste.

No que respeita ao “Complexo Pteroceriano com Lima pseudo-alternicosta”, é constituído essencialmente por um complexo de arenitos, de argilas e de calcários com intercalações de arenitos margosos, de arenitos calcários, de calcários cristalinos e de calcários margosos, e apresenta um conjunto de tonalidades predominantemente amareladas e, por vezes, avermelhadas, acinzentadas e acastanhadas.

O maciço rochoso explorado encontra-se fortemente fraturado em virtude da ocorrência de importantes acidentes tectónicos. As duas falhas regionais que o atravessam assumem orientações distintas: uma com direção N10-30W e pendores superiores a 70° para sudoeste, e outra com direção N60-70E e pendores superiores a 75° para noroeste, neste caso com preenchimentos de calcite. Face à presença das duas falhas, o processo de carsificação ocorre em todo o maciço rochoso, caracterizado pela presença de um nível com cerca de 2 m de espessura de calcário alterado, constituído em grande parte por material estéril.

O enquadramento geológico da região onde se insere o maciço calcário é mostrado na figura 3.18, sobre um extrato da Folha 30-D da carta geológica de Portugal, à escala 1:50000, publicada em 1965 pelos serviços geológicos de Portugal, o atual LNEG.



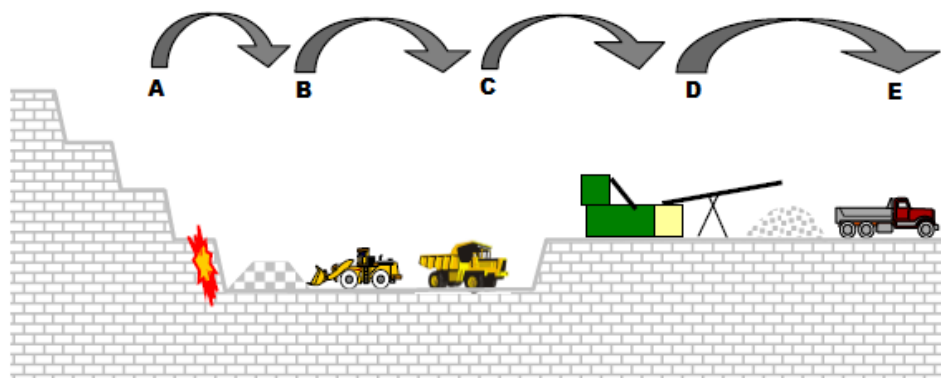
**Figura 3.18** Enquadramento geológico da Pedreira Vale Grande n° 2 (adaptado da carta geológica de Portugal, à escala 1:50000, Folha 30-D, “Alenquer”)



### 3.2.4.3 - Processamento

De acordo com a informação facultada pela empresa Agrepor, o ciclo de produção da Pedreira Vale Grande nº 2, que se apresenta na figura 3.19, envolve um conjunto de operações sequenciais que se traduzem em seis etapas, definidas com o propósito de se alcançar um compromisso entre a exploração e a modelação das áreas afetadas:

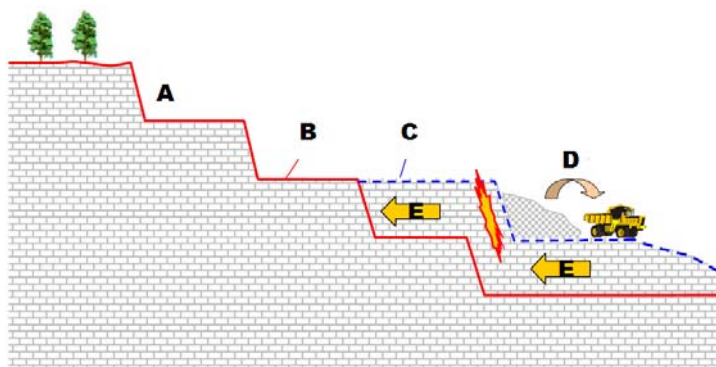
- a. desmatagem e decapagem;
- b. desmonte - exploração;
- c. carga;
- d. transporte;
- e. tratamento - britagem; e
- f. expedição.



Legenda: (A) desmonte; (B) carga; (C) transporte; (D) britagem; (E) expedição

**Figura 3.19** Ciclo de produção da pedra

Antes de cada etapa de exploração, é realizado um conjunto de operações com vista a garantir o máximo de aproveitamento do calcário explorado (figura 3.20). A primeira dessas operações passa pela desmatagem da vegetação de modo faseado, à medida das necessidades da escavação, seguida da decapagem dos terrenos virgens. Para tal, são utilizados equipamentos mecânicos como, a escavadora giratória, as pás carregadoras, e os *dumpers*.



Legenda: (A) lavra finalizada; (B) configuração final da escavação; (C) configuração intermédia da escavação; (D) exploração; (E) lavra

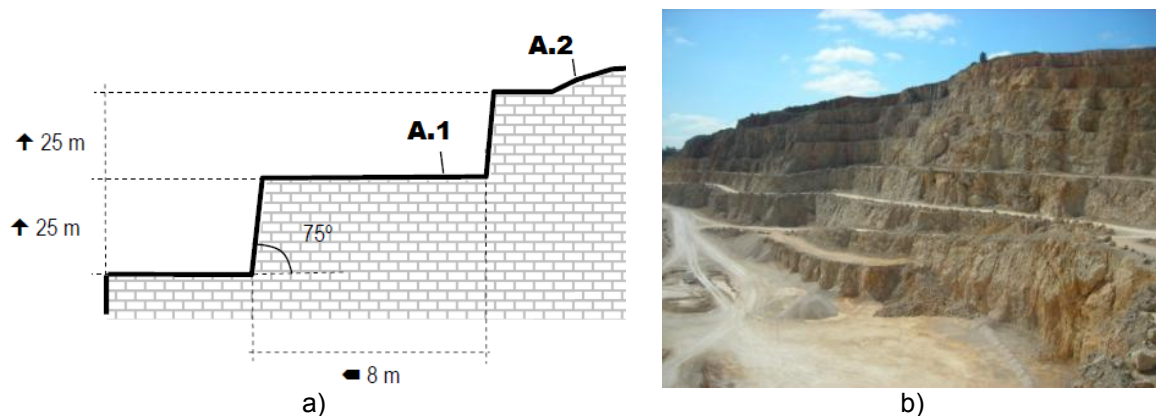
**Figura 3.20** Ciclo de exploração da pedra

Terminadas as operações de "limpeza" dos terrenos superficiais, procede-se à exploração do maciço rochoso mediante a utilização de explosivos, escavando-se primeiramente os degraus superiores a partir dos degraus já existentes. Este processo é executado de forma faseada visando racionalizar o aproveitamento do calcário em termos técnico-económicos e minimizar os impactos visuais decorrentes da atividade extrativa.

A exploração do calcário (etapa 2) compreende as fases seguintes:

- desmonte da zona noroeste, cujas frentes são exploradas até serem atingidos o limite da área licenciada e a configuração final;
- desmonte da zona oeste da área da pedreira, com o avanço das frentes de noroeste para sudoeste, até ser atingida a configuração final;
- desmonte da zona sul da área da pedreira até atingida a configuração final; e
- desmonte da zona central da área da pedreira até ser atingida a configuração final.

A configuração da pedreira sob o ponto de vista geométrico para a fase intermédia e para a fase final de exploração, tem por base as características geotécnicas do maciço rochoso. A exploração é realizada a céu aberto, com os degraus a apresentarem uma altura máxima de 25 m, largura de cerca de 8 m e uma inclinação com a horizontal da ordem de 75° (figura 3.21a). Quando é atingido o limite de exploração da frente, a configuração geométrica adotada tem em vista a recuperação futura da área explorada. Neste caso, a altura dos degraus varia entre 7,5 m e 10 m, a largura entre 5 m e 10 m e a inclinação com a horizontal é de cerca de 75° (figura 3.21b).



Legenda: (A.1) degrau intermédio; (A.2) topografia original

**Figura 3.21** Perfil da exploração: a) fase intermédia; b) fase final

Terminado o período de extração, procede-se ao carregamento (etapa 3) e transporte (etapa 4) dos calcários em *dumpers* com recurso a pás carregadores frontais. Os calcários são transportados para as centrais de processamento (etapa 5) e os estéreis para as escombreira. O período de execução da carga e do transporte é condicionado pela quantidade de material extraído, pela frota da empresa responsável pela pedreira e pela velocidade de execução dos equipamentos. Dependendo de alguns fatores inerentes ao ciclo de produção e à geometria da pedreira, a extração e o carregamento podem decorrer em simultâneo.

Nas centrais de processamento (figura 3.22a), o calcário é britado e posteriormente separado em pilhas de acordo com a sua classificação granulométrica, ficando em seguida armazenado a céu aberto por um período de tempo variável (figura 3.22b). Os rejeitados são removidos para as escombreyas temporárias ou definitivas.



**Figura 3.22** a) Central de processamento da Pedreira Vale Grande nº 2; b) armazenamento temporário de calcário após britagem

A fase final do ciclo de produção é denominada “expedição” (etapa 6) e corresponde ao carregamento de camiões com o material armazenado.

#### **3.2.4.4 - Amostragem**

O processo de amostragem do calcário decorreu, no essencial, como descrito na secção 3.2.1.3. Na tabela 3.4 é apresentada a folha de registo do processo de amostragem do calcário, com alguma da informação descrita a ser complementada pelo ilustrado na figura 3.23.



**Figura 3.23** Amostragem do calcário: a) pilha de material existente no parque de armazenamento da central de processamento da Pedreira Vale Grande nº 2; b) recolha da amostra

**Tabela 3.4** Registo do processo de amostragem do calcário

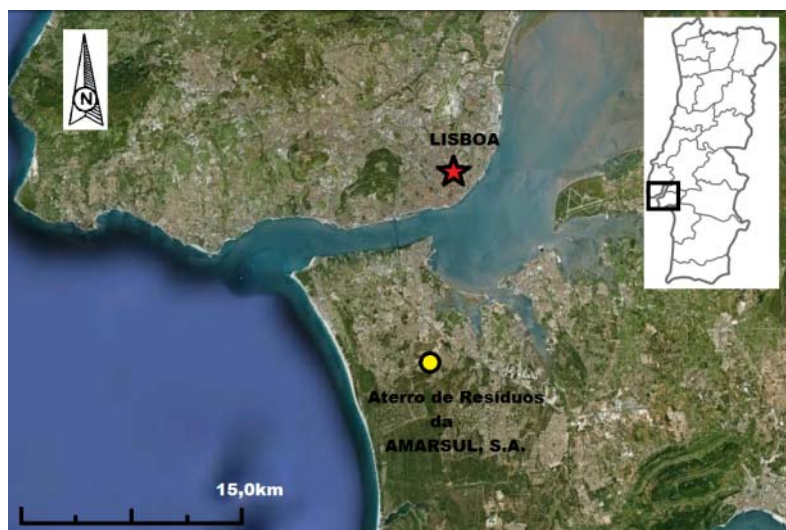
<b>Nome da empresa</b>	Agrepor, S.A.	<b>Data da recolha</b>	30/03/2011
<b>Localização da infraestrutura</b>	Pedreira Vale Grande nº 2 - freguesia de Meca.	<b>Hora da recolha</b>	11h40
<b>Tipo de procedimento para a produção do material</b>	Descrito na secção 3.2.4.3.	<b>Tipo de material</b>	Rocha sedimentar calcária (agregado natural).
<b>Descrição visual do material</b>	Material compacto, de grão fino, cor branca a amarelada, com uma forma irregular em virtude do processo de britagem. Em algumas amostras de mão são visíveis veios de calcite e algumas zonas de tonalidade castanha-avermelhada e cinza.		
<b>Descrição do depósito de armazenamento do material</b>	O material amostrado encontrava-se disposto numa pilha de material depositado a céu aberto (figura 3.23a), após uma primeira fase de britagem, aparentemente sem qualquer tipo de proteção contra agentes externos, em particular os atmosféricos. A pilha de onde o material foi recolhido tinha cerca de 5 m de altura, e uma extensão superior a 15 m.		
<b>Composição química do material</b>	Sem informação.		
<b>Número de blocos recolhidos</b>	20 blocos de dimensões superiores a 100 mm.	<b>Peso total</b>	100 kg.
<b>Recipiente de recolha</b>	3 sacos em nylon.		
<b>Finalidade da amostragem</b>	A durabilidade deste agregado natural servirá de referência aos resultados obtidos com os agregados reciclados e permitirá avaliar a sua durabilidade aos lixiviados. A legislação atual, o DL nº 183/2009, exclui a utilização de material calcário na camada de drenagem e recolha dos lixiviados.		
<b>Método de amostragem</b>	Ver tabela 3.1.		
<b>Tipo de preservação</b>	Ver tabela 3.1.		
<b>Parâmetros avaliados in situ</b>	Sem informação.		
<b>Observações suplementares</b>	Sem informação.		

### 3.2.5 - Lixiviado

#### 3.2.5.1 - Localização geográfica

O lixiviado utilizado como meio aquoso nos ensaios de DMA foi recolhido na célula C do aterro de RSU da AMARSUL, S.A.. A infraestrutura situa-se na região de Lisboa e Vale do Tejo, entre as povoações de Santa Marta de Corroios, a norte, de Quinta da Aniza, a oeste, de Belverde, a sul, e de Quinta do Conte da Cunha, a este, a cerca de 24 km da cidade de Lisboa (figura 3.24). A região encontra-se coberta pela folha nº 442, denominada “Barreiro”, da carta militar de Portugal, à escala 1:25000, publicada em 2009 pelo IGE.

O acesso rodoviário principal ao aterro de resíduos da AMARSUL é pela autoestrada A2, Lisboa-Algarve, à qual se segue o itinerário complementar nº 20 (IC 20), direção a Almada. A aproximação ao aterro é, posteriormente, pela N10, atravessando sequencialmente as localidades seguintes: Laranjeiro, Corroios, Vale Milhaços e Quinta da Aniza.



**Figura 3.24** Localização geográfica do aterro de resíduos da AMARSUL, com as coordenadas seguintes: 38°36'38.50"N; 9°08'51.30"O (adaptado de extrato do "Google earth" de 15/03/2012)

### 3.2.5.2 - Características do aterro

Com base na informação disponibilizada pela AMARSUL, na tabela 3.5 apresentam-se, segundo uma sequência estrutural da base para o topo, os principais elementos estruturais constitutivos do sistema de proteção basal do aterro de resíduos da AMARSUL, que pertence à classe de aterros para resíduos não perigosos.

**Tabela 3.5** Elementos constituintes do sistema de proteção basal do aterro de resíduos

Sistema de proteção basal	Elemento constituinte	Informação relevante
<b>Passivo</b>	Geocompósito bentonítico	Constituído por bentonite com 4500 g/m <sup>2</sup> compactada entre dois geotêxteis, um agulhado e outro não tecido, com um valor de $k = 1 \times 10^{-11}$ m/s.
	Geomembrana de PEAD	Espessura de 2 mm.
<b>Ativo</b>	Geotêxtil não tecido	Gramagem de 300 g/m <sup>2</sup> , com a função de proteção mecânica da geomembrana.
	Camada de drenagem	Material mineral drenante com um valor de $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s e espessura de 0,5 m.

A par da informação relativa ao sistema de proteção basal, refira-se ainda que o aterro de resíduos da AMARSUL é composto por três células. Na célula A foram depositados um total de  $6,5 \times 10^5$  ton de RSU; a célula B recebeu cerca de  $9 \times 10^5$  ton de RSU, tendo-se já iniciado o seu processo de selagem; e a célula C, donde foi recolhido o lixiviado utilizado no presente estudo, começou a ser explorada no ano de 2001, prevendo-se que o seu encerramento ocorra, apenas, em 2020. À data do mês de dezembro de 2011, a respetiva célula apresentava um volume total de resíduos depositados de 1861954 m<sup>3</sup> e uma altura entre 16 m e 24 m.

### **3.2.5.3 - Características dos resíduos depositados**

A composição física tipo dos resíduos depositados no aterro e as respectivas quantidades percentuais, disponibilizadas pela AMARSUL, são mostradas na tabela 3.6. Os valores apresentados, que correspondem ao peso húmido com um nível de confiança de 95%, mostram que 34,2% do total de resíduos depositados são de origem alimentar, bio-resíduos. No polo oposto encontram-se os resíduos classificados como perigosos, p. ex.: produtos químicos; tubos fluorescentes e lâmpadas de baixo consumo; pilhas; e acumulados, entre outros, visto que apenas 0,6% dos resíduos depositados pertencem a esta categoria.

**Tabela 3.6** Composição e quantidade de resíduos depositados no aterro de resíduos

Categoria	Subcategoria 1	Subcategoria 2	Composição (%)
Bio-Resíduos	Resíduos alimentares		34,2
	Resíduos de jardim		4,8
	Outros resíduos putrescíveis		1,6
	TOTAL		40,7
Papel/Cartão	Embalagens usadas	Embalagens de papel	0,7
		Embalagens de cartão	6,04
		SUBTOTAL	6,8
	Jornais, revistas, folhetos		5,2
	Outros resíduos de papel/cartão		0,2
	TOTAL		12,2
Plásticos	Filmes	PE>A3	4,3
		PE>A3	2,2
		Noutros materiais	0,2
		SUBTOTAL	6,6
	Embalagens rígidas	PET	1,5
		PEAD	1,02
		EPS	0,3
		SUBTOTAL	2,8
	Outras embalagens de plásticos		1,5
	Outros resíduos de plásticos		1,5
TOTAL		12,3	
Vidro	Embalagens usadas de vidro		5,04
	Outro vidro (não embalagem)		0,6
	TOTAL		5,7
Compósitos	Embalagens	Compósitas de cartão	1,2
		Outras embalagens compósitas	0,4
		SUBTOTAL	1,6
	Pequenos aparelhos eletrodomésticos		0,4
	Outros compósitos não embalados		1,04
TOTAL		3,04	
Têxteis	Embalagens têxteis usadas		0,1
	Outros têxteis		4,0
	TOTAL		4,1
Têxteis sanitários			7,5
Metais	Embalagem usada ferrosa		1,6
	Outros ferrosos		0,3
	Embalagem usada não ferrosa		0,5
	Outros não ferrosos		0,06
	TOTAL		2,4
Madeira	Embalagens usadas de madeira		0,5
	Outras madeiras		0,9
	TOTAL		1,3
Resíduos perigosos	Produtos químicos		0,2
	Tubos fluorescentes e lâmpadas de baixo consumo		0,05
	Pilhas e acumuladores		0,1
	Outros resíduos perigosos		0,3
	TOTAL		0,6
Outros	Embalagem		0,2
	Não embalagem		3,4
	TOTAL		3,6
Finos (<20 mm)			6,6

Legenda: PoliEtileno - PE; Politereflato de Etileno - PET; Expandable PolyStyrene - EPS



### 3.2.5.4 - Características do lixiviado

Conforme mencionado na secção 3.2.5.1, o lixiviado utilizado no presente estudo foi recolhido na célula C. Neste sentido e tendo em conta que não se procedeu à análise química do lixiviado recolhido, apresenta-se na tabela 3.7 um conjunto de dados informativos, facultados pela AMARSUL, que quantificam a qualidade do referido efluente. Destes dados são de destacar os valores relativos ao pH e à C.E., dois dos três parâmetros controlados no presente estudo (o outro é o Eh, parâmetro que não consta na tabela 3.7). Em ambos os casos, os valores obtidos no ano de 2003 são inferiores aos registados em 2010, o que indicia, no caso do pH, um aumento da basicidade do lixiviado com o decorrer da exploração da célula C, e no caso da C.E., um aumento da concentração dos iões dissolvidos no referido meio aquoso.

**Tabela 3.7** Composição química do lixiviado do aterro de resíduos em 2003, 2005 e 2010

Parâmetro	Unidade	Teores das substâncias químicas		
		2003	2005	2010
<i>pH</i>	Sorensen	7,0	8,0	8,1
<i>Condutividade</i>	mS/cm	12,0	29,5	34,6
<i>Fósforo total</i>	mg/l	-	39,0	44,0
<i>Cloretos, Cl</i>	g/l	15,9	4,0	4,9
<i>Carbonatos, CO<sub>3</sub><sup>-2</sup></i>	mg/l	72,0	<500,0	0,0
<i>Bicarbonatos, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	mg/l	242,0	19000,0	21000,0
<i>Fluoretos, F</i>	mg/l	<0,2	2,1	1,5
<i>Nitratos, NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	mg/l	<2,0	<3,0	<5,0
<i>Nitritos, NO<sub>2</sub><sup>-</sup></i>	mg/l	<0,03	<0,2	<0,015
<i>Sulfatos, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></i>	mg/l	500,0	6,0	360,0
<i>Sulfuretos</i>	mg/l	0,1	<0,4	6,4
<i>CBO</i>	mg/l	-	366,0	1600,0
<i>CQO</i>	g/l	2,0	3,7	10,0
<i>Fenóis</i>	mg/l	1,5	0,1	0,96
<i>Azoto amoniacal</i>	g/l	0,36	3,3	4,6
<i>Azoto Kjeldahl</i>	g/l	-	3,5	-
<i>Azoto total</i>	g/l	-	3,5	3,6
<i>Arsénio, As</i>	mg/l	<0,004	0,03	0,112
<i>Cádmio, Cd</i>	mg/l	<0,05	<0,02	<0,0004
<i>Crómio, Cr</i>	mg/l	0,4	0,4	1,113
<i>Chumbo, Pb</i>	mg/l	<0,5	<0,5	<0,005
<i>Potássio, K</i>	g/l	1,4	1,9	3,13
<i>Alumínio, Al</i>	mg/l	2,1	0,7	2,28
<i>Bário, Ba</i>	mg/l	1,3	0,28	0,47
<i>Cobre, Cu</i>	mg/l	<0,2	0,13	<0,001
<i>Zinco, Zn</i>	mg/l	0,72	0,35	0,54
<i>Manganês, Mn</i>	mg/l	0,8	0,019	<0,001
<i>Antimónio, Sb</i>	mg/l	<0,005	<0,04	0,012
<i>Níquel, Ni</i>	mg/l	0,3	0,5	0,26
<i>Selénio, Se</i>	mg/l	<0,002	<0,02	0,0042
<i>Sódio, Na</i>	g/l	2,2	2,8	3,1
<i>Boro, B</i>	mg/l	1,7	3,2	2,54
<i>Ferro, Fe</i>	mg/l	11,0	4,6	7,0
<i>Cálcio, Ca</i>	g/l	1,3	0,02	0,034
<i>Magnésio, Mg</i>	mg/l	223,0	42,0	43,0
<i>Mercúrio, Hg</i>	mg/l	<0,01	0,005,0	<0,01
<i>COT</i>	g/l	0,81	1,4	1,86
<i>HAP</i>	mg/l	2,0	0,7	1,12
<i>AOX</i>	mg/l	0,273	8,2	1,5
<i>Cianetos</i>	mg/l	180,0	0,01	<0,005
<i>Composto organoclorados</i>	mg/l	0,055	-	-

Legenda: Compostos organo-halogenados adsorvíveis - AOX



### 3.2.5.5 - Amostragem

Na tabela 3.8 figuram os principais elementos do processo de amostragem do lixiviado, sendo alguma da informação aí apresentada complementada pela figura 3.25.

**Tabela 3.8** Registo do processo de amostragem do lixiviado

<b>Nome da empresa</b>	AMARSUL - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A..	<b>Data da recolha</b>	18/05/2011
<b>Localização da infraestrutura</b>	Aterro de resíduos não perigosos da AMARSUL - concelho do Seixal.	<b>Hora da recolha</b>	15h00
<b>Tipo de produção do material</b>	Descrito na secção 2.3.5.1.	<b>Tipo de material</b>	Efluente líquido produzido na infraestrutura.
<b>Descrição visual do material</b>	Líquido de tonalidade escura (negra).		
<b>Descrição da estrutura de drenagem e recolha do material</b>	O lixiviado percola através da camada mineral de drenagem e é recolhido pela tubagem e removido até à ETAL. O lixiviado foi recolhido a partir de um dos poços de recolha do lixiviado pertencente ao sistema de drenagem (figura 3.25a).		
<b>Composição química do material</b>	Ver tabela 3.7.		
<b>Volume recolhido</b>	40 l.		
<b>Recipiente</b>	8 garrações de 5 l em PE (figura 3.25b).		
<b>Finalidade da amostragem</b>	Utilização como meio aquoso nos ensaios de DMA.		
<b>Método de amostragem</b>	Bombagem do lixiviado para um balde de plástico, seguida da transferência para os garrações em PE com auxílio de um funil (figura 3.25b), sendo depois transportado para o LNEC. No decurso do processo de amostragem foram utilizadas luvas de látex para evitar o contacto com o lixiviado.		
<b>Tipo de preservação</b>	Armazenamento em câmara frigorífica à temperatura de 4 °C até à sua utilização nos ensaios.		
<b>Parâmetros avaliados in situ</b>	Sem informação.		
<b>Observações suplementares</b>	Sem informação.		



a)



b)

**Figura 3.25** Amostragem do lixiviado: a) bombagem do lixiviado a partir do poço de recolha; b) transferência do lixiviado para os recipientes de recolha e transporte

## 3.3 - Métodos e equipamentos

### 3.3.1 - Caracterização petrográfica

O estudo petrográfico desenvolvido no presente trabalho teve como principais objetivos investigar a ocorrência de alterações nas características texturais e mineralógicas dos quatro materiais selecionados depois de submetidos aos ensaios de DMA e utilizar a informação adquirida na interpretação dos resultados obtidos nos ensaios efetuados para o estudo das propriedades físicas e da durabilidade dos materiais. A análise petrográfica envolveu a realização de um estudo macro e micropetrográfico dos quatro materiais, recorrendo-se para tal, respetivamente, a amostras de mão e a lâminas delgadas.

#### 3.3.1.1 - Macropetrografia

##### 3.3.1.1.1 - Equipamento

O estudo macropetrográfico foi realizado com o auxílio de uma lupa (figura 3.26a) e de *HCl* (figura 3.26b), em conformidade com o descrito na Norma Portuguesa - NP EN 932-3 (2010), e de uma lupa binocular (figura 3.27), indicada na norma ASTM C856 (2011).



**Figura 3.26** Material utilizado no estudo macropetrográfico: a) lupa (régua de escala em cm); b) frasco com *HCl*

A lupa foi utilizada com vista a uma análise mais minuciosa da superfície dos quatro materiais selecionados, particularmente para a determinação da dimensão dos seus constituintes, para a identificação das suas espécies minerais ou de qualquer outro tipo de material não observável a olho nu e, ainda, para a confirmação de algumas observações retidas da análise a olho nu.

A utilização do *HCl*, por seu turno, teve como único objetivo a identificação do agregado natural britado grosso que entra na constituição do  $AB_{RCD}$ .

A lupa binocular, com o auxílio de uma máquina fotográfica, foi utilizada na obtenção das fotos macroscópicas, as quais se apresentam nas secções 3.4.1 e 3.4.4.



Legenda: (A) oculares; (B) corpo da objetiva; (C) objetiva e (D) comando de focagem

**Figura 3.27** Lupa binocular

As duas normas anteriormente indicadas referem ainda outros equipamentos, como o canivete. Porém, no caso da observação efetuada não se consideraram necessários à correta e completa descrição dos materiais.

### **3.3.1.1.2 - Metodologia**

O estudo macropetrográfico do ASIC, do basalto e do calcário decorreu de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 932-3 (2010). Para o estudo do AB<sub>RCD</sub> considerou-se a norma ASTM C856 (2011), desenvolvida para a análise petrográfica do betão.

A metodologia adotada na análise macropetrográfica englobou três fases: (1) a primeira correspondeu à análise macroscópica dos provetes antes da realização dos ensaios de DMA; (2) a segunda teve início após a conclusão dos ensaios de DMA; e (3) a terceira teve por objetivo comparar as descrições macroscópicas das duas fases anteriores e observar, essencialmente, as diferenças na textura, na cor e no estado de alteração dos materiais ensaiados.

A análise macropetrográfica realizada na primeira fase encontra-se descrita na secção 3.4.1, ao passo que a realizada na segunda fase se apresenta na secção 3.4.4. As análises foram realizadas no Laboratório de Geotecnia Ambiental - LGAmb, do LNEC e no Departamento de Ciências da Terra - DCT, da Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT, da Universidade Nova de Lisboa - UNL.

Na tabela 3.9 referem-se os provetes utilizados nas análises macropetrográficas realizadas nas duas primeiras fases do estudo.

**Tabela 3.9** Provete observados no estudo macropetrográfico

Fase de estudo	Material	Provete
<b>1ª Fase</b> <i>(antes do ensaio de DMA)</i>	AB <sub>RCD</sub>	AB <sub>RCD</sub>
	ASIC	ASIC
	Basalto	Bas
	Calcário	Cal
<b>2ª Fase</b> <i>(após o ensaio de DMA)</i>	AB <sub>RCD</sub>	AB <sub>RCD</sub> _DMA_A
		AB <sub>RCD</sub> _DMA_L
		AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>I</sub> _A
		AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>I</sub> _L
	ASIC	ASIC_DMA_A
		ASIC_DMA_L
		ASIC_DMA <sub>I</sub> _A
		ASIC_DMA <sub>I</sub> _L
	Basalto	Bas_DMA_A
		Bas_DMA_L
		Bas_DMA <sub>I</sub> _A
		Bas_DMA <sub>I</sub> _L
	Calcário	Cal_DMA_A
		Cal_DMA_L
		Cal_DMA <sub>I</sub> _A
		Cal_DMA <sub>I</sub> _L

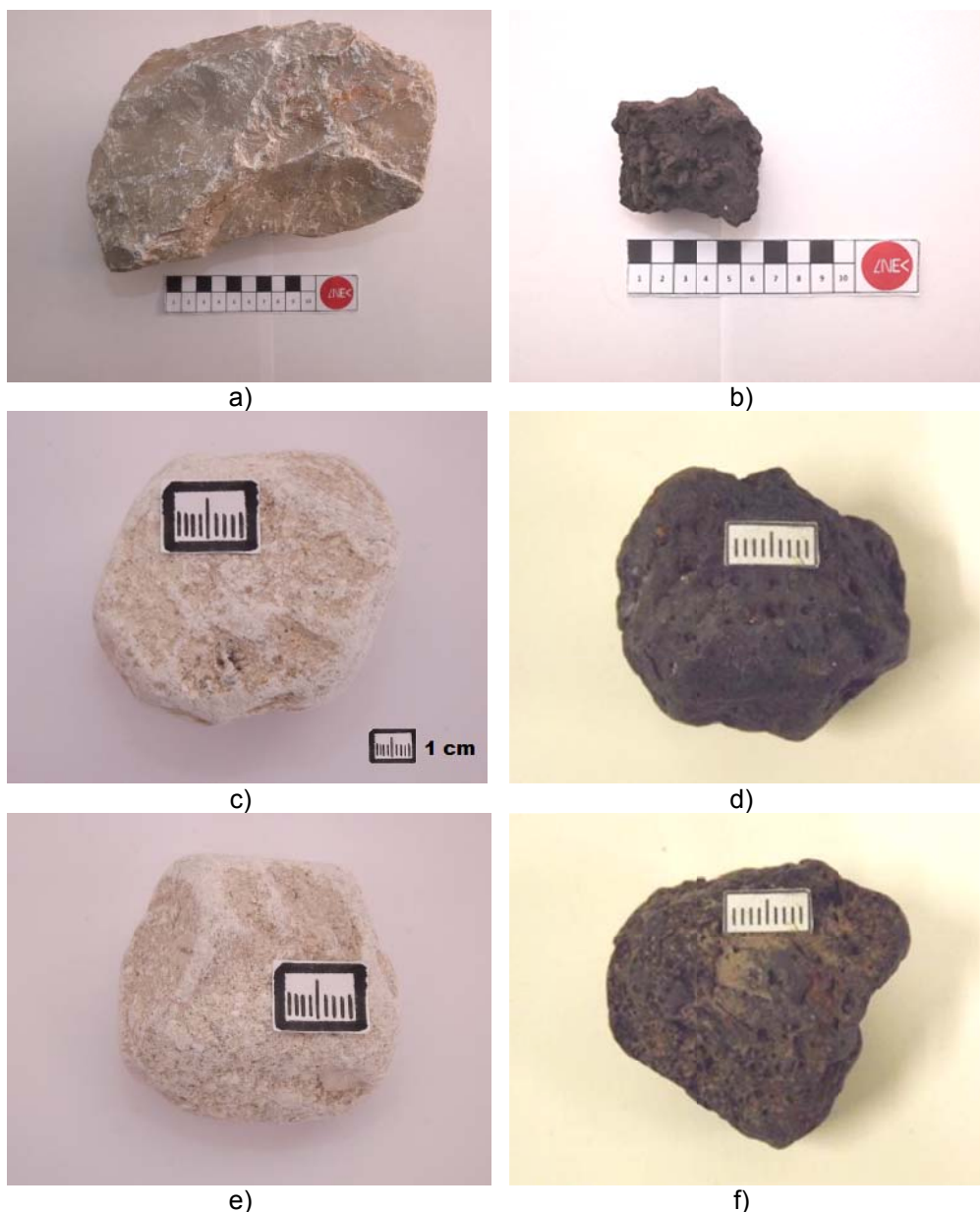
**a) Preparação dos provetes**

Os provetes analisados (tabela 3.9) faziam parte do conjunto de provetes utilizados na realização dos ensaios de DMA, com exceção dos provetes recolhidos diretamente nas amostras provenientes das quatro primeiras infraestruturas referidas na secção 3.2.

No que respeita aos provetes utilizados na primeira fase do estudo macropetrográfico, ou seja, os provetes que não foram submetidos aos ensaios de DMA, a única preparação a assinalar está relacionada com a lavagem da superfície dos provetes Bas e Cal com água, com o propósito de eliminar o pó acumulado na superfícies destes em resultado do processamento a que os materiais foram sujeitos nas centrais de processamento. Em relação aos provetes AB<sub>RCD</sub> e ASIC não foi necessária qualquer preparação prévia.

O procedimento seguido na preparação dos provetes utilizados na segunda fase, isto é, os provetes provenientes dos ensaios de DMA, encontra-se descrito na secção 3.3.3.2.1.

Na figura 3.28 apresentam-se exemplos dos provetes do calcário e do ASIC. As figuras 3.28a e 3.28b mostram os provetes antes da realização dos ensaios de DMA, as figuras 3.28c e 3.28d, os provetes depois de submetidos aos ensaios de DMA em água e no lixiviado e as figuras 3.28e e 3.28f, os provetes depois dos ensaios de DMA em água e no lixiviado, com imersão - I, prévia nos mesmos meios aquosos.



**Figura 3.28** Exemplo de provetes utilizados no estudo macroscópico: a) Cal; b) ASIC; c) Cal\_DMA\_A; d) ASIC\_DMA\_L; e) Cal\_DMA<sub>i</sub>\_A; f) ASIC\_DMA<sub>i</sub>\_L

Na tabela 3.10 apresentam-se a massa e a dimensão de cada provete analisado. De acordo com a norma NP EN 932-3 (2010), o conhecimento destas duas grandezas é necessário ao estudo macropetrográfico por ser com base nos seus valores que se selecciona o método a adotar na descrição macroscópica.

**Tabela 3.10** Características dos provetes utilizados no estudo macropetrográfico

Proвете	Massa (kg)	Dimensão (mm)	Observação
AB <sub>RCD</sub> ASIC Bas Cal	1,00 - 3,00	≤100	A forma e a dimensão dos provetes resultam do tipo de processamento a que foram sujeitos nas centrais de processamento.
	3,00 - 5,00	>100	
AB <sub>RCD</sub> _DMA_A AB <sub>RCD</sub> _DMA_L ASIC_DMA_A ASIC_DMA_L Bas_DMA_A Bas_DMA_L Cal_DMA_A Cal_DMA_L	0,04 - 0,06	30 - 45	A forma e a dimensão dos provetes estão de acordo com o método considerado para a realização dos ensaios de DMA, que é descrito na secção 3.3.3.2.1.
AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>i</sub> _A AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>i</sub> _L ASIC_DMA <sub>i</sub> _A ASIC_DMA <sub>i</sub> _L Bas_DMA <sub>i</sub> _L Bas_DMA <sub>i</sub> _A Cal_DMA <sub>i</sub> _L Cal_DMA <sub>i</sub> _A	0,04 - 0,06	30 - 45	

*b) Procedimento para a execução da análise*

Conforme referido na secção 3.3.1.1.2, para o estudo macropetrográfico foram utilizadas diferentes normas em função de tipo de material analisado.

O estudo macropetrográfico dos provetes de ASIC, de basalto e de calcário da primeira e segunda fase decorreu de acordo com o método descrito na NP EN 932-3 (2010) para as amostras de rocha, tendo incluindo a análise das seguintes características: (1) dimensão das partículas dos principais constituintes, textura, porosidade, cor e alteração; (2) composição mineralógica; e (3) outras características não referenciadas na norma mas identificadas nos provetes analisados. Refira-se que, de acordo com a NP EN 932-3 (2010), o estudo macropetrográfico pode ser realizado sobre amostras oriundas de tarolos de sondagens, ou sobre agregados armazenados em pilhas ou em frentes de exploração de pedreira, e decorrer mediante dois métodos distintos no caso do material analisado se tratar de uma amostra de rocha (apresenta uma dimensão superior a 63 mm e uma massa superior a 5 kg) ou de uma amostra de agregado (apresenta uma dimensão variável entre 0,1 mm e 63,0 mm, variando a massa em função da sua dimensão).

O estudo macroscópico dos provetes de AB<sub>RCD</sub>, realizado com base na norma ASTM C856 (2011), incluiu, sempre que possível, a análise dos seguintes elementos: (1) agregado britado grosso, quanto ao tipo de agregado, litologia, textura, dimensão e forma; (2) agregado britado fino, no que diz respeito à litologia, forma e textura das partículas; (3) matriz, em termos da cor, presença de fraturas e contacto entre a matriz e os agregados naturais que compõem o AB<sub>RCD</sub>; (4) porosidade; e (5) outras características não referidas na norma mas identificadas nos provetes analisados.

A apresentação do estudo macropetrográfico dos quatro materiais contemplou os seguintes dados: (1) identificação do provete; (2) descrição macroscópica do material; e (3) ilustração fotográfica.

### **3.3.1.2 - Micropetrografia**

#### **3.3.1.2.1 - Equipamento**

O estudo micropetrográfico foi realizado com recurso a um microscópio petrográfico (figura 3.29), tal como preconizado nas normas EN 12407 (2007) e ASTM C856 (2011). As observações foram efetuadas nas ampliações 50x, 100x e 200x.



Legenda: (A) oculares; (B) canhão; (C) revolver, (D) objetivas, (E) parafuso macro e micrométrico; (F) lâmpada

**Figura 3.29** Equipamento utilizado no estudo micropetrográfico: microscópio petrográfico

#### **3.3.1.2.2 - Metodologia**

A análise micropetrográfica do ASIC, do basalto e do calcário decorreu de acordo com o procedimento descrito na norma EN 12407 (2007), e a do AB<sub>RCD</sub> segundo o descrito na norma ASTM C856 (2011).

A metodologia adotada para o estudo micropetrográfico compreendeu as mesmas fases do estudo macropetrográfico descrito na secção 3.3.1.1.2. As diferenças microscópicas observadas nas lâminas delgadas preparadas a partir dos provetes submetidos aos ensaios de DMA tiveram em consideração, na sua generalidade, os seguintes elementos: a matriz e algumas características das espécies minerais constituintes dos materiais.

A análise micropetrográfica correspondente à primeira e à segunda fase do estudo é descrita, respetivamente, na secção 3.4.1 e na secção 3.4.4. As observações microscópicas foram realizadas no DCT-FCT-UNL.

Na tabela 3.11 apresentam-se as lâminas delgadas utilizadas nas análises micropetrográficas realizadas nas duas primeiras fases do estudo.

**Tabela 3.11** Laminas delgadas utilizadas no estudo micropetrográfico

Fase	Material	Lâmina delgada
<b>1ª Fase</b> (antes do ensaio de DMA)	AB <sub>RCD</sub>	AB <sub>RCD</sub>
	ASIC	ASIC
	Basalto	Bas
	Calcário	Cal
<b>2ª Fase</b> (após o ensaio de DMA)	AB <sub>RCD</sub>	AB <sub>RCD</sub> _DMA_A
		AB <sub>RCD</sub> _DMA_L
		AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>i</sub> _A
		AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>i</sub> _L
	ASIC	ASIC_DMA_A
		ASIC_DMA_L
		ASIC_DMA <sub>i</sub> _A
		ASIC_DMA <sub>i</sub> _L
	Basalto	Bas_DMA_A
		Bas_DMA_L
		Bas_DMA <sub>i</sub> _A
		Bas_DMA <sub>i</sub> _L
	Calcário	Cal_DMA_A
		Cal_DMA_L
		Cal_DMA <sub>i</sub> _A
		Cal_DMA <sub>i</sub> _L

#### a) Preparação das lâminas delgadas

As lâminas delgadas indicadas na tabela 3.11 foram preparadas no DCT-FCT-UNL e no Departamento de Geologia - DG, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa - FCUL. O processo de preparação das lâminas foi idêntico em ambos os casos e decorreu conforme a seguir se apresenta.

Inicialmente procedeu-se ao corte dos provetes em lâminas paralelepípedicas com uma dimensão próxima de 40x30x20 mm<sup>3</sup>, recorrendo-se, para tal, a um equipamento composto por um disco diamantado. De seguida, os provetes, já com o formato laminar pretendido, foram polidos de um dos lados com uma máquina de polimento e com o auxílio de um abrasivo, antes de serem colados às lâminas.

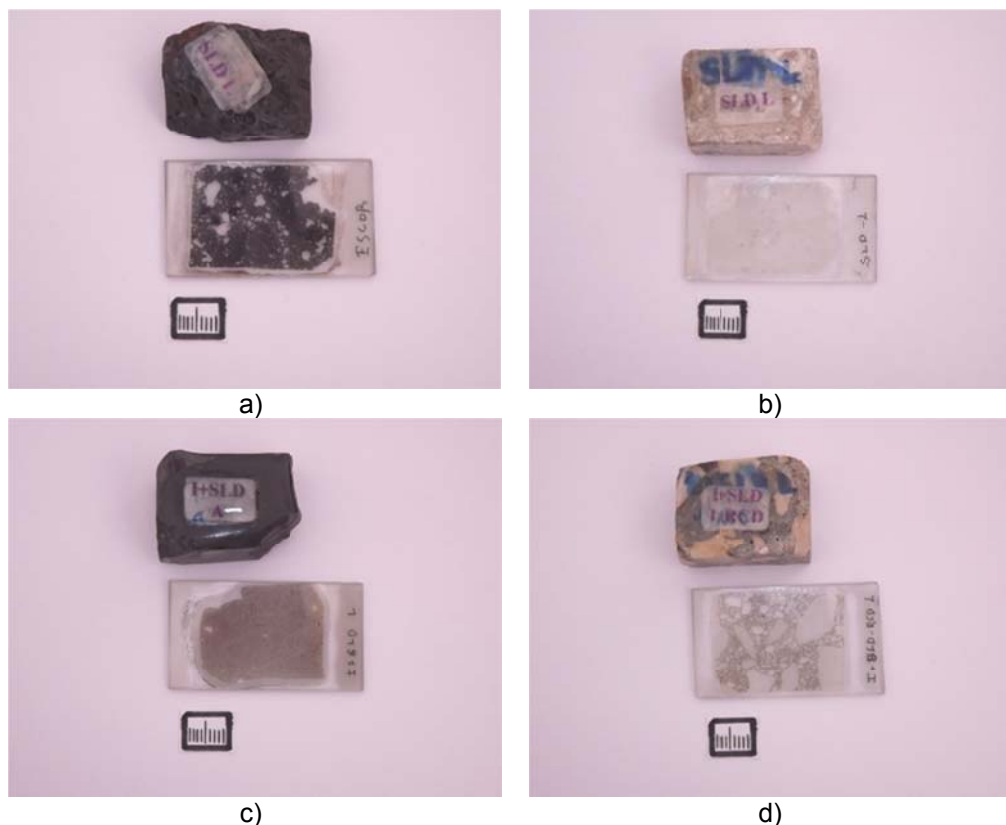
O polimento dos provetes é considerado o ponto crítico de todo o processo de preparação das lâminas delgadas, dada a maior probabilidade da operação não ser bem-sucedida. Como tal, é fundamental e imprescindível que após cada polimento, os provetes sejam examinados, para verificar se a superfície dos mesmos se encontra completamente plana e polida. Este controlo de qualidade foi realizado mediante a colocação de uma segunda lâmina sobre a face polida do provete e com a introdução de uma gota de água entre ambas as faces. Sempre que não se verificou o completo contacto entre a segunda lâmina e o provete, procedeu-se a novo polimento, seguida de nova verificação. Constatado o contacto total entre as duas faces, a superfície do provete foi limpa com álcool e colada na lâmina de vidro com um pouco de resina. Posto isto, o conjunto provete+lâmina foi colocado a secar, durante um período de tempo na ordem das 24 h.

Na etapa final de preparação das lâminas delgadas, o conjunto provete+lâmina foi, primeiramente, cortado de modo a apresentar uma espessura com cerca de 300 µm a 400 µm e, em



seguida, a superfície do provete foi novamente polida até se obter uma espessura na ordem de 30  $\mu\text{m}$  a 40  $\mu\text{m}$ .

A figura 3.30 mostram quatro exemplos que refletem o resultado final da preparação das lâminas delgadas utilizadas no estudo micropetrográfico.



**Figura 3.30** Exemplo de lâminas delgadas utilizadas no estudo microscópico: a) ASIC; b) Cal\_DMA\_L; c) Bas\_DMA\_L; d) AB<sub>RCD</sub>\_DMA\_L

#### *b) Procedimento para a execução da análise*

Conforme referido na secção 3.3.1.2.2, o estudo micropetrográfico do ASIC, do basalto e do calcário foi realizado com base na norma EN 12407 (2007), e o do AB<sub>RCD</sub> de acordo com a norma ASTM C856 (2011).

As análises microscópicas das lâminas delgadas preparadas a partir de provetes de ASIC, de basalto e de calcário incluíram o estudo dos principais elementos constituintes, nos quais se incluem as espécies minerais e a matriz do material.

A análise microscópica das lâminas delgadas preparadas a partir de provetes de AB<sub>RCD</sub> envolveu a análise das características dos agregados naturais britados, grosso e fino, e da matriz do material.

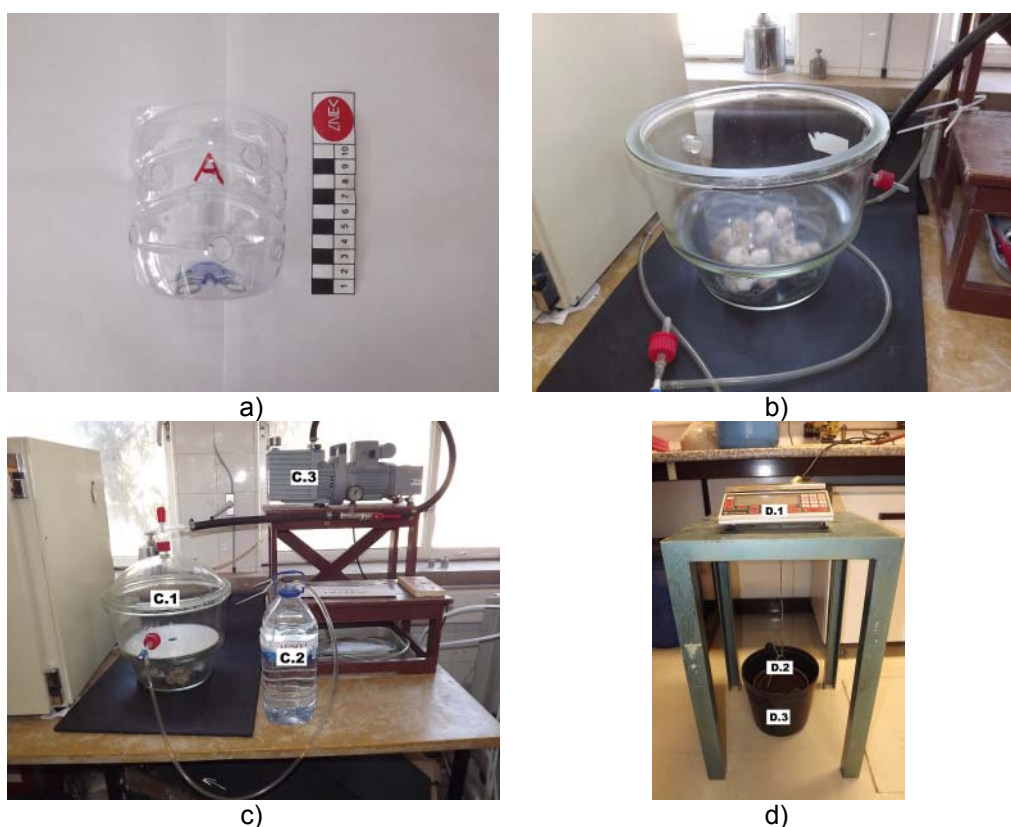
A apresentação do estudo micropetrográfico dos quatro materiais contemplou os seguintes dados: (1) identificação da lâmina delgada; (2) descrição microscópica do material; e (3) ilustração fotográfica.

### 3.3.2 - Caracterização física

A caracterização física desenvolvida no presente trabalho envolveu a avaliação da  $M_{VR}$ , da  $M_{VA}$ , da  $P_e$  e do  $w_{max}$  dos quatro materiais selecionados. A sua realização teve como principais objetivos utilizar a informação obtida na interpretação dos resultados dos ensaios efetuados para o estudo da durabilidade dos quatro materiais selecionados e investigar a ocorrência de alterações nas referidas propriedades físicas iniciais daqueles materiais depois de submetidos aos ensaios de DMA.

#### 3.3.2.1 - Equipamento

Para a caracterização física dos materiais em estudo foram utilizados vários equipamentos e utensílios, a maioria dos quais são apresentados na figura 3.31. A precisão da balança utilizada era de 0,01 g e a estufa, ventilada, permitia a manutenção de uma temperatura a  $105 \pm 5$  °C, durante, pelo menos,  $24 \pm 2$  h. A máquina de vácuo e o exsiccador foram utilizados em conjunto de modo a criar, no interior deste último, as condições ambientais necessárias à realização do ensaio de caracterização física. O conjunto balança, cesto em rede metálica e balde em plástico foi utilizado para a pesagem das massas saturadas dos provetes imersos e com as faces enxutas.



**Figura 3.31** Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização física: a) recipiente de plástico; b) exsiccador aberto; c) (C.1) exsiccador fechado, (C.2) reservatório de 5 l com água desmineralizada, e (C.3) bomba de vácuo; d) (D.1) balança com precisão centesimal, (D.2) cesto em rede metálica, e (D.3) balde em plástico

### 3.3.2.2 - Metodologia

Os ensaios de caracterização física foram realizados de acordo com o procedimento de ensaio descrito em LERO-PE01 (1993).

A metodologia adotada para o estudo das propriedades físicas selecionadas englobou as três fases já mencionadas no estudo macro e micropetrográfico, ou seja: (1) determinação das propriedades físicas iniciais dos materiais (primeira fase); (2) determinação das propriedades físicas dos materiais após os ensaios de DMA (segunda fase); e (3) comparação dos resultados obtidos nas duas fases anteriores, com o objetivo de avaliar e quantificar a influência dos ensaios de DMA nas propriedades físicas estudadas.

Os resultados obtidos na primeira fase e respetiva análise são descritos na secção 3.4.2, enquanto que os obtidos na segunda fase são apresentados na secção 3.4.5. Os ensaios de caracterização física foram realizados no LGAmb do LNEC.

Na tabela 3.12 apresentam-se os provetes utilizados nos ensaios de caracterização física efetuados nas duas primeiras fases

**Tabela 3.12** Provetes utilizados nos ensaios de caracterização física

Fase	Ensaio	Material	Provete
1ª Fase (antes do ensaio de DMA)	$M_{VR}$ , $M_{VA}$ , $P_e$ e $w_{max}$	AB <sub>RCD</sub> ASIC Basalto Calcário	AB <sub>RCD</sub> ASIC Bas Cal
2ª Fase (após o ensaio de DMA)		AB <sub>RCD</sub>	AB <sub>RCD_DMA_A</sub> AB <sub>RCD_DMA_L</sub> AB <sub>RCD_DMA<sub>I</sub>_A</sub> AB <sub>RCD_DMA<sub>I</sub>_L</sub>
		ASIC	ASIC_DMA_A ASIC_DMA_L ASIC_DMA <sub>I</sub> _A ASIC_DMA <sub>I</sub> _L
		Basalto	Bas_DMA_A Bas_DMA_L Bas_DMA <sub>I</sub> _A Bas_DMA <sub>I</sub> _L
		Calcário	Cal_DMA_A Cal_DMA_L Cal_DMA <sub>I</sub> _A Cal_DMA <sub>I</sub> _L

#### 3.3.2.2.1 - Preparação dos provetes

De acordo com o expresso em LERO-PE01 (1993), na realização dos ensaios de caracterização física deve ser utilizado um número mínimo de 3 provetes, cada um com uma forma paralelepédica ou cilíndrica e um volume compreendido entre 25 cm<sup>3</sup> e 250 cm<sup>3</sup>. Na impossibilidade de se preparar provetes com essas formas geométricas, a referência acima indicada permite a utilização de provetes com uma forma irregular.

Para o estudo das propriedades físicas selecionadas, os provetes foram preparados de acordo com o procedimento previsto no método seguido para a realização do ensaio de DMA, descrito na secção 3.3.3.2.1, justificando-se esta metodologia por se pretender comparar as propriedades físicas dos materiais antes e após a realização daquele ensaio. Todos os provetes apresentavam assim uma massa compreendida entre 40 g e 60 g e uma forma subangular, com exceção dos provetes preparados a partir de amostras de ASIC, cuja forma era arredondada.

Em cada ensaio foram utilizados 6 provetes, tendo-se preparado, deste modo, um total de 120 provetes. Destes, 96 corresponderam a provetes provenientes dos ensaios de DMA e os restantes 24, a provetes preparados de modo idêntico aos anteriores mas diretamente recolhidos nas amostras transportadas das quatro primeiras infraestruturas mencionadas na secção 3.2.

Na figura 3.32 podem observar-se dois exemplos de conjuntos ensaiados com 6 provetes cada. Na figura 3.32a), apresentam-se os provetes de basalto provenientes do ensaio de DMA em água, e na figura 3.32b) os provetes de basalto resultantes do ensaio de DMA realizado após imersão prévia dos provetes no lixiviado.



**Figura 3.32** Exemplo de provetes utilizados nos ensaios de caracterização física: a) Bas\_DMA\_A; b) Bas\_DMA\_L

#### **3.3.2.2.2 - Procedimento para a execução do ensaio**

Conforme referido na secção 3.3.2.2, a determinação da  $M_{VR}$ , da  $M_{VA}$ , da  $P_e$  e do  $w_{max}$  seguiu o procedimento de execução previsto em LERO-PE01 (1993).

A execução do ensaio dividiu-se em quatro etapas, iniciando-se com a identificação e a introdução de cada conjunto de seis provetes no interior de um recipiente em plásticos, igualmente identificado (figura 3.33a).

Na segunda etapa, os recipientes com os provetes foram colocados no interior do exsiccador (figura 3.33b), onde se aplicou vácuo de forma gradual, por intermédio de uma bomba, até se atingir 1 bar (figura 3.33c). O vácuo foi mantido durante um período de tempo na ordem das 24 h de forma a assegurar a eliminação do ar contido nos poros dos provetes. Findo esse período, foi introduzida água desmineralizada no interior do exsiccador (figura 3.33d) com um caudal que permitisse a imersão completa dos provetes após 15 min do seu início. O vácuo de 1 bar foi mantido nesta fase e nas seguintes 24 h. Concluído este período, a bomba de vácuo foi desligada, de modo a se repor a

pressão atmosférica no interior do exsicador, e manteve-se os provetes nestas condições por um período de 24 h.



Legenda: (A.1) AB<sub>RCD\_DMA\_A</sub>; (A.2) AB<sub>RCD\_DMA\_L</sub>; (A.3) AB<sub>RCD\_DMA\_L\_A</sub>; (A.4) AB<sub>RCD\_DMA\_L\_L</sub>

**Figura 3.33** Procedimento para a realização das duas primeiras etapas do ensaio de caracterização física: a) quatro conjuntos com 6 provetes cada nos recipientes em plástico; b) recipientes e provetes no exsicador; c) provetes sujeitos à pressão de 1 bar; d) introdução de água desmineralizada no exsicador

Na terceira etapa, procedeu-se primeiramente à pesagem da massa saturada de cada provete, colocando-o num cesto suspenso numa balança de precisão centesimal e imerso em água (figura 3.34a). Após retirar o provete do cesto imerso em água, as suas faces foram enxutas com um pano limpo e seco, procedendo-se depois à pesagem da sua massa saturada com as suas faces enxutas (figura 3.34b).

Na última etapa do ensaio, os provetes foram secos em estufa a  $105 \pm 5$  °C, durante  $24 \pm 2$  h, e em seguida colocados no exsicador para permitir o seu arrefecimento por um período de tempo nunca inferior a 40 min. Terminado este período, a massa seca de cada provete foi pesada na balança de precisão centesimal. Conhecidos os valores referentes às massas saturadas, com o provete imerso e com o provete com as faces enxutas, e à massa seca, calcularam-se os valores referentes à  $M_{VR}$ , à  $M_{VA}$ , à  $P_e$  e ao  $w_{max}$ .



**Figura 3.34** Procedimento para a realização da terceira etapa do ensaio de caracterização física: a) pesagem da massa saturada de um provete de calcário imerso; b) pesagem da massa saturada de um provete de calcário com as faces enxutas

A  $M_{VR}$ , definida como a relação entre a massa do provete seco e o volume da sua parte sólida, diferença entre o volume aparente do provete e o volume dos seus poros abertos e fechados, foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$M_{VR} = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \quad (3.1)$$

a  $M_{VA}$ , que se define pela relação entre a massa do provete seco e o seu volume aparente, volume limitado pela superfície externa do provete, incluindo os vazios, a partir da seguinte expressão:

$$M_{VA} = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \quad (3.2)$$

a  $P_e$ , que se define pela relação entre o volume de poros acessíveis à água e o volume da amostra incluindo todos os seus poros, a partir da expressão:

$$P_e = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100\% \quad (3.3)$$

e o  $w_{max}$ , definido como a relação entre o aumento da massa da amostra devido à sua imersão parcial em água e a massa seca da amostra tendo a sua superfície seca, com base na expressão:

$$w_{max} = \frac{M_3 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (3.4)$$

em que,

$M_1$  = massa do provete seco;

$M_2$  = massa saturada do provete imerso; e

$M_3$  = massa saturada do provete com as faces enxutas.

Importa salientar que os resultados finais da  $M_{VR}$ , da  $M_{VA}$ , da  $P_e$  e do  $w_{max}$  correspondem à média dos resultados obtidos em 6 provetes.

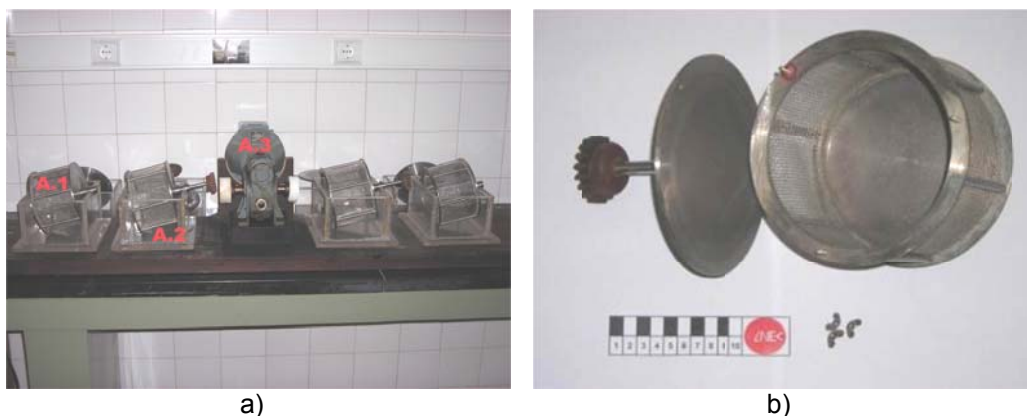


### 3.3.3 - Ensaio de DMA

#### 3.3.3.1 - Equipamento

O ensaio de DMA foi realizado mediante a utilização de um equipamento idêntico ao descrito no “*Suggested method for determination of the slake durability index*” (ISRM, 1977), exceto no número de tambores, que foram quatro, no lugar dos dois propostos pelo método. A utilização dos quatro tambores foi particularmente útil, dado que permitiu empregar em cada ensaio os dois meios aquosos: a água e o lixiviado.

A figura 3.35a mostra o equipamento utilizado nos ensaios de DMA, sendo este composto pelos três elementos principais seguintes: (1) motor; (2) quatro tambores cilíndricos; e (3) quatro recipientes paralelepípedicos em acrílico. Na figura 3.35b mostra-se, em pormenor, um dos tambores utilizados.



Legenda: (A.1) tambor cilíndrico; (A.2) recipiente em acrílico; (A.3) motor

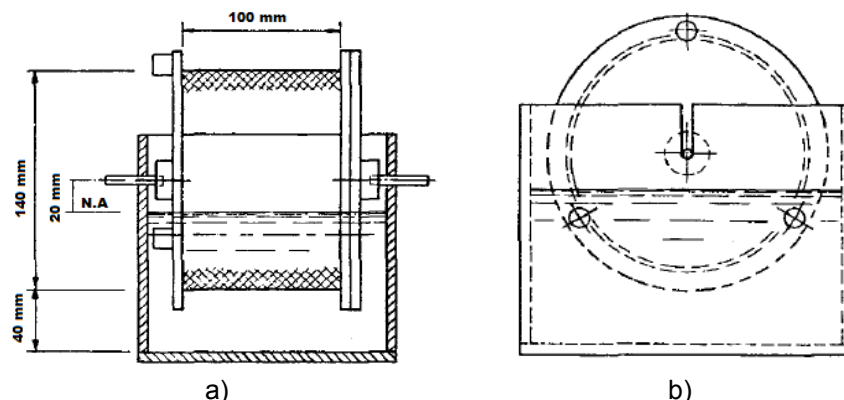
**Figura 3.35** a) Equipamento utilizado no ensaio de DMA; b) pormenor do tambor

O motor, ao qual são acoplados diretamente dois dos tambores por intermédio de um eixo com uma roda dentada na sua extremidade, permite a rotação completa dos tambores em simultâneo e à mesma velocidade do motor. Os dois tambores das extremidades são ligados aos tambores centrais pelo processo já indicado, permitindo a rotação em simultâneo dos quatro tambores.

Os tambores, de formato cilíndrico e com diâmetro interno de 140 mm, são constituídos por duas tampas laterais em aço inoxidável, afastadas de 100 mm e ligadas entre si por uma malha de abertura de 2 mm, igualmente em aço inoxidável (figura 3.36a). A malha dos tambores é adequada para resistir às deformações e ao desgaste, quer resultantes da sua interação mecânica com os provetes, quer das que pudessem advir da temperatura a que os tambores são sujeitos durante o período de secagem dos provetes. Como particularidade, é de referir que uma das tampas laterais dos tambores é amovível para permitir a colocação dos provetes no interior dos tambores.

Por último, os recipientes paralelepípedicos em acrílico são constituídos por uma base e uma cobertura, amovível, com dimensões que permitem alojar o tambor no seu interior (figura 3.36a e 3.36b). Os recipientes devem ser completamente estanques na base de modo a não verterem líquido para o exterior e suficientemente resistentes para suportarem o peso do conjunto tambores+provetes

durante o período de execução dos ensaios de DMA. No decurso deste ensaio, a cobertura deve estar colocada sobre a base do recipiente.



Legenda: Nível do meio aquoso no interior do recipiente em acrílico - N.A

**Figura 3.36** Conjunto tambor+recipiente: a) dimensões do tambor e disposição relativa do tambor e do meio aquoso em relação ao recipiente; b) conjunto tambor+recipiente visto de perfil (adaptado de ISRM, 1977)

A par do equipamento apresentado, foram ainda utilizados os seguintes equipamentos e utensílios: (1) uma estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de  $105 \pm 5$  °C durante pelo menos  $24 \pm 2$  h; (2) quatro exsicadores; e (3) uma balança com uma precisão de 0,01 g.

### 3.3.3.2 - Metodologia

Na realização do ensaio de DMA foram utilizadas dois meios aquosos, a água da rede de abastecimento público e o lixiviado do aterro de RSU, e quatro conjuntos de provetes por cada um dos quatro materiais seleccionados. Entenda-se que um conjunto de provetes era composto por 20 provetes, 10 provetes por cada tambor, dado o equipamento utilizado permitir empregar em cada um dos dois meios aquosos, dois tambores, conforme referido na secção anterior.

Os dois primeiros conjuntos de provetes foram submetidos aos ensaios de DMA com os dois meios aquosos já referidos, seguindo o procedimento recomendado pelo “*Suggested method for determination of the slake-durability index*” (ISRM, 1977): dois ciclos de desgaste, cada um com 10 min de duração e à velocidade constante de 20 rpm, num total de 400 rotações, 200+200. Neste estudo procedeu-se ainda à realização de um terceiro ciclo de desgaste de 600 rotações, pelo que cada ensaio foi realizado com um total acumulado de 1000 rotações.

Nos restantes dois conjuntos de provetes, previamente à realização dos ensaios de DMA que decorreram de igual modo ao procedimento descrito no parágrafo anterior, procedeu-se à imersão dos provetes nos dois meios aquosos por um período de tempo de 15 dias.

A utilização do lixiviado e a imersão prévia de 15 dias tiveram como principal objetivo submeter os materiais a condições mais agressivas e prolongadas que as previstas no método recomendado pela ISRM (*ibid.*). Com a realização do terceiro ciclo de desgaste, que também não é previsto pelo método adotado, pretendeu-se submeter os materiais a um período mais prolongado de ações mecânicas.



A tabela 3.13 resume os ensaios de DMA efetuados e mostra a identificação adotada para os provetes nos quatro conjuntos ensaiados.

**Tabela 3.13** Resumo dos ensaios de DMA

Meio aquoso		Proвете
Sem imersão prévia	Água	AB <sub>RCD</sub> _DMA_A ASIC_DMA_A Bas_DMA_A Cal_DMA_A
	Lixiviado	AB <sub>RCD</sub> _DMA_L ASIC_DMA_L Bas_DMA_L Cal_DMA_L
Com imersão prévia de 15 dias	Água	AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>i</sub> _A ASIC_DMA <sub>i</sub> _A Bas_DMA <sub>i</sub> _A Cal_DMA <sub>i</sub> _A
	Lixiviado	AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>i</sub> _L ASIC_DMA <sub>i</sub> _L Bas_DMA <sub>i</sub> _L Cal_DMA <sub>i</sub> _L

Concomitantemente à realização dos ensaios de DMA, sem e com imersão prévia dos provetes, efetuou-se o controlo físico-químico da água e do lixiviado através da medição do pH, do Eh e da C.E.

Nos ensaios de DMA sem imersão prévia dos provetes, as leituras dos três parâmetros referidos em cada meio aquoso foram efetuadas nos dois recipientes em acrílico, nas quatro fases seguintes: (1) antes do 1º ciclo de desgaste; (2) no início do 2º ciclo - 24±2 h após o 1º ciclo; (3) no início do 3º ciclo - 24±2 h após o 2º ciclo; e (4) após o 3º ciclo - 1 h±30 min após o 3º ciclo.

Nos ensaios de DMA com imersão prévia, a par do programa de medições referido, procedeu-se também ao controlo físico-químico dos dois meios aquosos ao longo do período de imersão de 15 dias. Contudo, neste caso não se seguiu um plano idêntico em todas as imersões e os valores obtidos correspondem a uma única medição pelas razões apresentadas na secção 3.3.3.2.3.

Os ensaios de DMA e o controlo físico-químico dos meios aquosos foram realizados no LGAmb. Os resultados obtidos são apresentados na secção 3.4.3.

### 3.3.3.2.1 - Preparação dos provetes

O processo de preparação dos provetes decorreu em duas etapas: a primeira etapa foi realizada no Laboratório de Mecânica das Rochas - LMR, do Núcleo de Fundações e Obras Subterrâneas - NFOS, do Departamento de Barragens de betão - DBB, do LNEC; a segunda etapa foi concretizada no LGAmb.

Na primeira etapa, as amostras transportadas para o LNEC (figura 3.37a) foram cortadas em cubos com as dimensões 40x35x35 mm, sendo estas próximas das dimensões dos provetes a utilizar nos ensaios de DMA (figura 3.37b). Ao todo foram cortados entre 100 e 120 cubos por cada um dos quatro materiais selecionados, dado ser necessários 20 provetes por cada um dos quatro conjuntos de provetes a ensaiar. A opção pelo corte de 20 a 40 cubos a mais que a quantidade mínima

necessária foi uma medida preventiva caso a fase seguinte de preparação dos provetes não decorresse dentro da normalidade esperada.

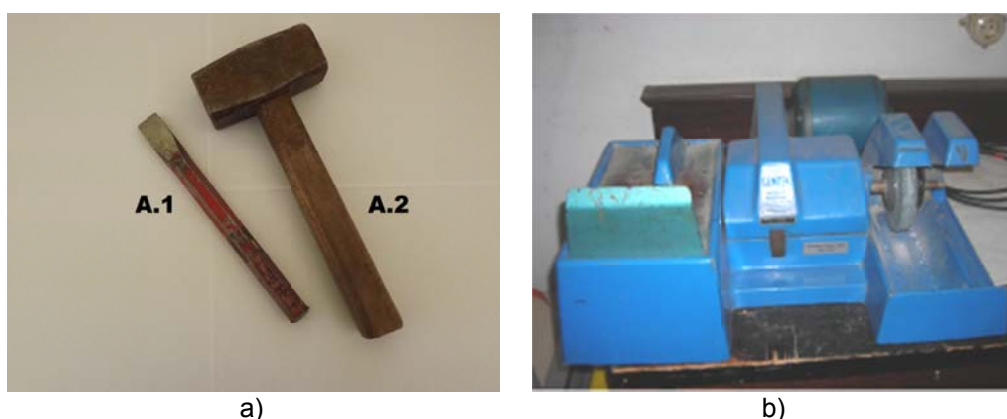


**Figura 3.37** Primeira fase de preparação dos provetes de calcário: a) amostra inicial; b) 10 cubos provenientes da máquina de corte

Na segunda fase de preparação dos provetes utilizou-se um martelo e um escopro (figura 3.38a), e um esmerilador (figura 3.38b).

Inicialmente, os cubos foram trabalhados com o escopro e com o martelo, tendo em vista a obtenção de provetes com uma forma próxima do pretendido. De seguida, as arestas e/ou outras zonas mais salientes dos provetes foram boleadas no esmerilador, mas sem tornar as superfícies totalmente arredondadas.

A massa de cada provete preparado estava compreendida entre 40 g e 60 g, pelo que cada conjunto de 10 provetes utilizados num tambor perfazia um total de 400 g a 600 g.

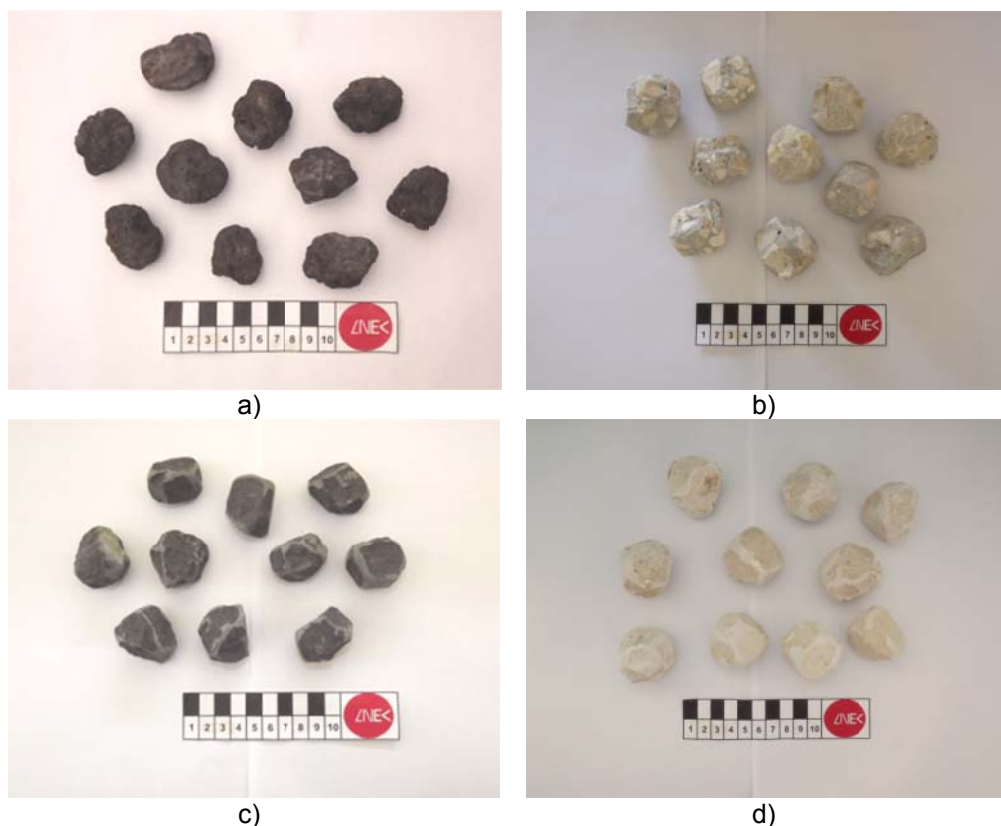


**Figura 3.38** Material utilizado na segunda fase de preparação dos provetes: a) (A.1) escopro e (A.2) martelo; b) esmerilador

Na figura 3.39 apresentam-se quatro exemplos do resultado final da fase de preparação dos provetes.

Na figura 3.39c e na figura 3.39d é perceptível o boleamento das arestas dos provetes de basalto e de calcário, designadamente as zonas mais claras comparativamente à tonalidade geral. O mesmo se aplica aos provetes de AB<sub>RCD</sub> (figura 3.39b), apesar de não ser tão visível como nos anteriores. A forma final destes três tipos de provetes foi do tipo subangular.

No caso dos provetes de ASIC, estes foram preparados com uma forma mais arredondada (figura 3.39a), em virtude da impossibilidade de preparar provetes com uma forma subangular em resultado das características do material.



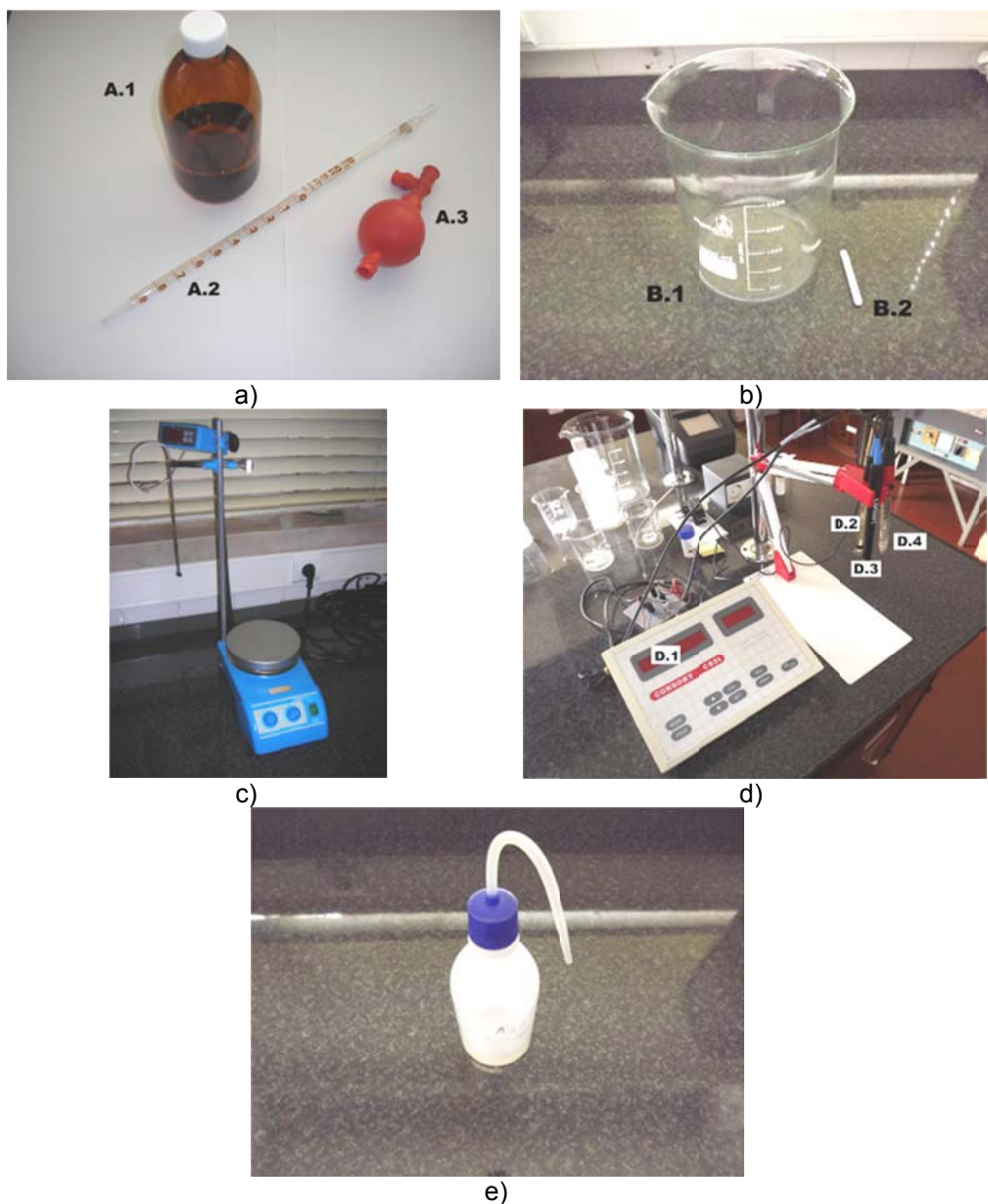
**Figura 3.39** Exemplo de provetes utilizados nos ensaios de DMA: a) 10 provetes de ASIC; b) 10 provetes de AB<sub>RCD</sub>; c) 10 provetes de basalto; d) 10 provetes de calcário

A preparação dos provetes com uma forma subangular e arredondada, contrariamente ao indicado no método, que preconiza uma forma aproximadamente esférica, teve por objetivo incrementar a exposição dos provetes à ação mecânica provocada pelo ensaio, dado que, tendo em conta o descrito na secção 2.5.6.2, diversos autores defendem que os resultados obtidos nos ensaios de DMA com provetes esféricos podem não ser totalmente representativos do comportamento dos materiais.

#### 3.3.3.2.2 - Procedimento para a acidificação do lixiviado

A acidificação do lixiviado, que à data da sua recolha no aterro de RSU da AMARSUL apresentava um valor de pH de 7,6, para um valor de pH de 5,5 mediante a utilização *HCl*, justifica-se pelas razões seguintes: (1) nos ensaios de DMA pretendia-se submeter os materiais a condições químicas mais agressivas do que as habitualmente observadas nos aterros de resíduos; e (2) os lixiviados nos aterros de RSU podem apresentar valores de pH inferiores a 7,0. O processo de acidificação foi efetuado no LGAmb, com recurso aos seguintes meios: (1) solução a 50% de *HCl*, pipeta volumétrica de 10 ml e pompeta (figura 3.40a); (2) copo de precipitação de 3000 ml e barra

magnética cilíndrica de 45 mm de comprimento (figura 3.40b); (3) agitador eletromagnético (figura 3.40c); (4) multímetro eletroquímico Consort C831, e elétrodos de pH, de Eh e de C.E. (figura 3.40d); e (5) frasco lavador em plástico (figura 3.40e).



**Figura 3.40** Material e equipamento utilizados no processo de acidificação do lixiviado: a) (A.1) frasco com solução a 50% de  $HCl$ , (A.2) pipeta volumétrica de 10 ml e (A.3) pompeta; b) (B.1) copo de precipitação de 3000 ml e (B.2) barra magnética cilíndrica de 45 mm de comprimento; c) agitador eletromagnético; d) (D.1) multímetro eletroquímico Consort C831, e (D.2) elétrodos de Eh, (D.3) de pH, e (D.4) de C.E.; e) frasco lavador

A acidificação do lixiviado englobou várias etapas, iniciando-se o procedimento com a transferência do lixiviado armazenado num dos garrafões de 5 l, acondicionados no frigorífico do LABoratório de Engenharia Sanitária - LABES, do Núcleo de Engenharia Sanitária - NES, do Departamento de Hidráulica e Ambiente - DHA, do LNEC, à temperatura de 4 °C, para o copo de precipitação. Face à menor capacidade deste último, optou-se por acidificar 2,5 l de lixiviado de cada

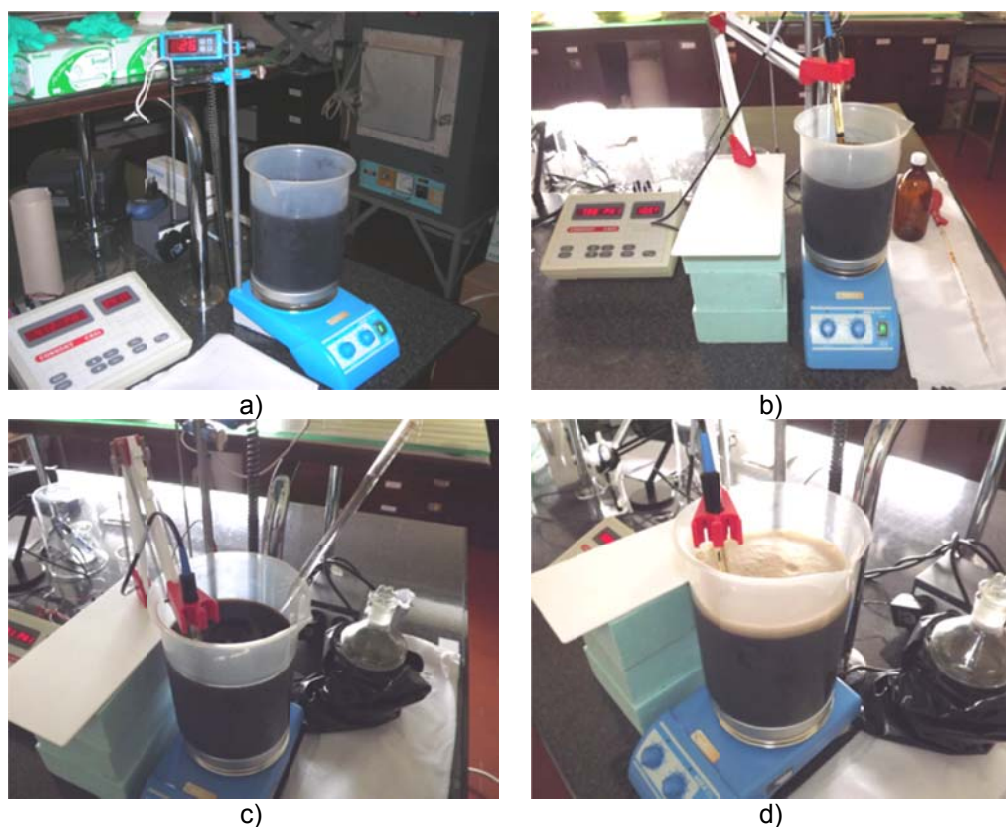
vez (figura 3.41a). De seguida, procedeu-se à medição do pH do lixiviado (figura 3.41b). Tal procedimento foi adotado para se compararem os valores do pH do lixiviado aquando da recolha no aterro de RSU e no momento da prévia à sua acidificação, sempre que o período de armazenamento foi superior a um mês.

Durante o processo de diminuição do pH do lixiviado até 5,5, o lixiviado foi homogeneizado no agitado eletromagnético, a uma velocidade de 200 rpm, e o pH monitorizado.

Para a acidificação do lixiviado foi adicionado, de forma faseada, a solução a 50% de  $HCl$ , mediante a utilização da pipeta volumétrica e da pompete. Em cada doseamento eram adicionados volumes individuais de 10 ml, num total de 140 ml por cada 2,5 l (figura 3.41c).

O processo de acidificação foi bastante moroso e metuculoso, uma vez que, face ao desconhecimento sobre a capacidade tampão do lixiviado, era fundamental efetuar-se um controlo rigoroso da evolução do seu pH de modo a não se ultrapassar o valor de 5,5. Na acidificação dos primeiros 2,5 l de lixiviado, observou-se que após a adição de 30 ml de  $HCl$ , este começou a reagir sob a forma de uma espuma de cor amarelada, conforme se apresenta na figura 3.41d, o que indicia a presença de quantidades elevadas de matéria orgânica no lixiviado, tornando-se a reação cada vez mais intensa com o decorrer da adição da referida solução.

O processo de acidificação foi, por esta razão, interrompido em períodos de tempo compreendidos entre 20 min e 40 min, tornando-o assim ainda mais moroso.



**Figura 3.41** Procedimento adotado para a acidificação do lixiviado: a) copo de precipitação com 2500 ml de lixiviado no agitador magnético; b) homogeneização do lixiviado e instalação do elétrico de pH; c) adição de 10 ml da solução a 50% de  $HCl$  ao lixiviado, com controlo do pH; d) formação de espuma na superfície do lixiviado em reação à adição da solução de  $HCl$



Nos ensaios de DMA com imersão prévia dos provetes no lixiviado, a solução resultante do período de imersão foi posteriormente utilizada na realização dos daqueles ensaios.

### 3.3.3.2.3 - Procedimento para a imersão dos provetes

A imersão prévia dos provetes por um período de 15 dias foi um procedimento adotado, conforme já oportunamente mencionado, com o propósito de se avaliar a influência do tempo de contacto provete-meio aquoso, em particular com o lixiviado, na durabilidade dos materiais. A imersão foi realizada no LGAmb, em meio aberto, numa sala climatizada à temperatura constante de  $20 \pm 2$  °C, com recurso: (1) a cesto de rede metálica inoxidável (figura 3.42a), de dimensão adequada à disposição dos provetes sem pontos de contacto entre si (figura 3.42b); e (2) a recipiente em plástico, cuja dimensão permitisse a inserção do cesto de rede metálica (figura 3.42c) e a imersão dos provetes nos meios aquosos (figura 3.42d).



**Figura 3.42** a) Cesto de rede metálica inoxidável; b) 20 provetes de AB<sub>RCD</sub> colocados no cesto de rede metálica; c) recipiente em plástico com cesto de rede metálica; d) 20 provetes de AB<sub>RCD</sub> imersos no lixiviado e 20 em água

Ao todo foram realizadas 8 imersões, num total de 160 provetes, correspondentes a 40 provetes por material. Destes, 20 provetes, com uma massa total compreendida entre 0,80 kg e 1,20 kg, foram imersos em 5 l de lixiviado e os restantes 20, com massa idêntica, imersos em 5 l de água. O processo de execução da imersão foi dividido em três etapas, iniciando-se com cada conjunto de 20 provetes a ser previamente seco em estufa a  $105 \pm 5$  °C, durante um período de tempo da ordem de  $24 \pm 2$  h. Concluído o período de secagem, cada conjunto de 20 provetes foi colocado no

- 158 -

exsicador com vista ao seu arrefecimento, durante um período de tempo nunca inferior a 40 min, e em seguida determinada a sua massa seca inicial. Caso a diferença entre os valores de massa de cada conjunto de 20 provetes em duas pesagens consecutivas fosse superior a 0,1% ao valor da pesagem imediatamente anterior, os provetes voltavam à estufa a  $105 \pm 5$  °C, até se verificarem diferenças entre pesagens inferiores ou iguais a 0,1%. Neste estudo tal nunca se verificou.

Na segunda etapa procedeu-se à imersão dos provetes em água e no lixiviado (figura 3.43a), em meio aberto, durante um período de tempo de 15 dias.

Na última etapa, efetuou-se a transferência dos provetes inicialmente imersos para tabuleiros em alumínio (figura 3.43a e figura 3.43b), seguida dos procedimentos já descritos para a primeira etapa, ou seja, secagem em estufa a  $105 \pm 5$  °C durante um período de tempo da ordem de  $24 \pm 2$  h, arrefecimento no exsicador (figura 3.43c) e pesagem (figura 3.43d e figura 3.43e). Com esta pesagem pretendeu-se avaliar a variação da massa seca de cada conjunto de 20 provetes antes e após a sua imersão nos dois meios aquosos.

Terminada a etapa de imersão, arrefecimento e secagem, cada conjunto de 20 provetes e correspondentes meios aquosos, foram distribuídos, respetivamente, pelos dois tambores e pelos dois recipientes do equipamento do ensaio de DMA. Dado a ocorrência de perda de solução por evaporação nos dois meios aquosos durante os 15 dias de imersão, entre 1,0 l e 1,5 l, nos ensaios de DMA com imersão prévia dos provetes, o mesmo meio aquoso foi utilizado para realizar os dois ensaios de DMA em cada material.



**Figura: 3.43** Procedimento adotado na imersão dos provetes de  $AB_{RCD}$ : a) aspeto dos 20 provetes após imersão em água; b) aspeto dos 20 provetes após imersão no lixiviado; c) arrefecimento dos dois conjuntos de 20 provetes nos exsiccadores; d) pesagem dos 20 provetes que estiveram imersos em água; e) pesagem dos 20 provetes que estiveram imersos no lixivado

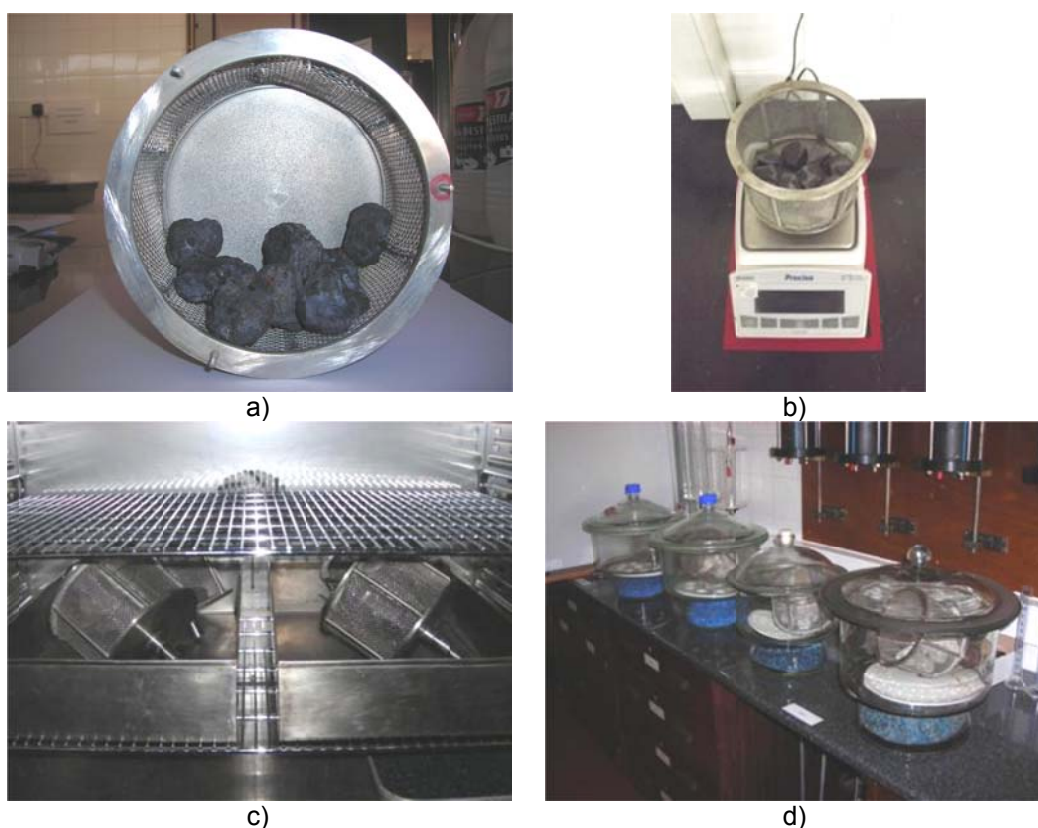
#### 3.3.3.2.4 - Procedimento para a execução do ensaio

A execução do ensaio de DMA dividiu-se em três etapas, iniciando o procedimento com a introdução de 10 provetes em cada um dos quatro tambores (figura 3.44a) pertencentes ao equipamento. Estes provetes foram previamente preparados conforme o processo descrito na secção 3.3.3.2.1. Cada conjunto tambor+provetes foi pesado (figura 3.44b) e em seguida introduzido na estufa (figura 3.44c), a  $105 \pm 2$  °C, durante  $24 \pm 2$  h, com o objetivo de determinar: (1) o teor em água dos provetes de cada material e (2) a massa seca inicial dos 10 provetes em cada conjunto tambor+provetes, dado o seu valor ser necessário para o cálculo do  $I_d$  em cada ciclo de desgaste. No



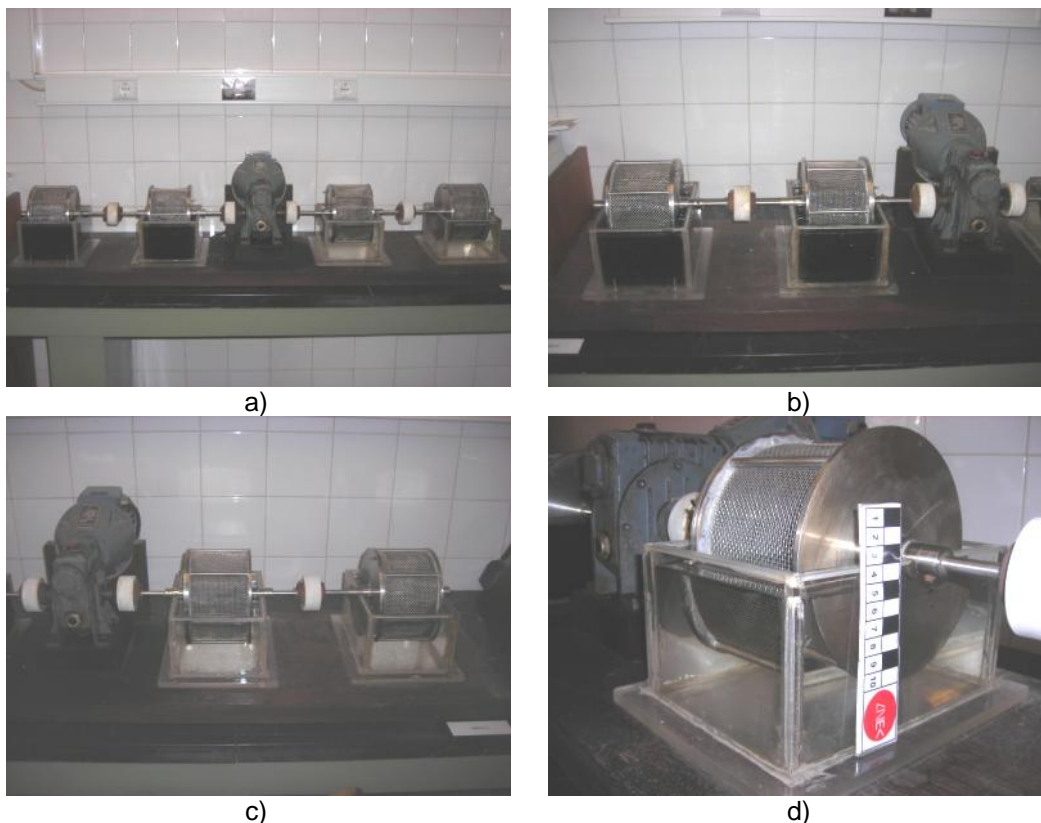
final do período de tempo mencionado,  $24 \pm 2$  h, cada conjunto tambor+provetes foi transferido para um exsicador (figura 3.44d) até ao seu arrefecimento, que nunca decorreu durante um período de tempo inferior a 40 min. Terminado o arrefecimento, procedeu-se à pesagem do conjunto, à semelhança do ilustrado na figura 3.44b. Caso a diferença entre os valores da sua massa em duas pesagens consecutivas fosse superior em 0,1% ao valor da primeira pesagem, o conjunto voltava à estufa para continuar o processo de secagem, em acordo com o previsto pelo método. Neste estudo nunca se verificou essa necessidade.

Deve-se salientar que no caso dos provetes previamente imersos nos meios aquosos, a massa seca inicial utilizada no cálculo do  $I_d$  em cada ciclo de desgaste dos ensaios de DMA correspondeu à massa seca de cada 10 provetes, dos 20 imersos em cada meio aquoso, pesada após os 15 dias de imersão.



**Figura: 3.44** Primeira etapa do procedimento de realização do ensaio de DMA: a) introdução de 10 provetes no tambor; b) secagem de tambor+provetes na estufa; c) arrefecimento do tambor+provetes no exsicador; d) pesagem do provetes+tambor

Na segunda etapa, procedeu-se à montagem de cada conjunto tambor+provetes nos quatro recipientes disponíveis (figura 3.45a), previamente preenchidos com 2,5 l de água, dois (figura 3.45b), e com 2,5 l de lixiviado, os restantes dois (figura 3.45c). Concretizado o descrito, na última etapa os quatro tambores, com os provetes imersos nos respetivos meios aquosos (figura 3.45d), foram sujeitos a três ciclos de desgaste.



**Figura: 3.45** Segunda etapa de ensaio: a) montagem dos quatro tambores+provetes, nos recipientes; b) dois conjuntos tambor+provetes parcialmente imersos em lixiviado; c) dois conjuntos tambor+provetes parcialmente imersos em água; d) pormenor do conjunto tambor+provetes montado no recipiente preenchido com água

Os dois primeiros ciclos foram executados nas condições recomendadas pelo “*Suggested method for determination of the slake durability index*” (ISRM, 1977), ou seja, com a duração de 10 min cada ciclo e à velocidade constante de 20 rpm, num total de 200+200 rotações. No terceiro ciclo, não previsto no método, os provetes foram submetidos a mais 30 min de ensaio, à mesma velocidade de rpm, num total de 600 rotações. Deste modo, os três ciclos de desgaste totalizaram 1000 rotações. No final de cada um dos três ciclos, cada conjunto tambor+provetes foi seco em estufa para a determinação da massa seca final dos provetes referentes a esse mesmo ciclo, seguindo-se o procedimento já descrito nesta secção para a primeira etapa do ensaio.

O resultado do ensaio de DMA, expresso como  $I_{d2}$ , corresponde, de acordo com o preconizado no método, ao valor da percentagem da massa seca do material retido no tambor no final do segundo ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio. Assim, o valor de  $I_{d2}$  no final dos dois ciclos de desgaste (200+200 rotações) foi calculado pela seguinte expressão:

$$I_{d2} = \frac{C - D}{A} \times 100\% \quad (3.5)$$

em que,

A = massa seca inicial dos 10 provetes;

C = massa seca dos 10 provetes após o segundo ciclo de desgaste; e

D = massa do tambor

Deve-se salientar que os resultados apresentados para  $I_{d2}$  correspondem à média dos valores de  $I_{d2}$  obtidos em dois tambores, dado que nos ensaios de DMA utilizaram-se dois conjuntos de 10 provetes em cada meio aquoso.

Para além do valor de  $I_{d2}$ , também se apresentam os resultados para o  $I_{d1}$  e o  $I_{d5}$ , que correspondem, respetivamente, ao  $I_d$  do material no final do primeiro ciclo, 200 rotações, e do quinto ciclo, 1000 rotações. Em ambos os casos, os resultados correspondem à média dos valores dos respetivos  $I_d$  obtidos em dois tambores.

Concluído o ensaio de DMA, os provetes foram conservados em sacos de plástico, devidamente fechados e identificados com o tipo de material ensaiado, o meio aquoso de ensaio e a data do termo do ensaio, e armazenados em local fora do alcance da luz natural, uma vez que em complemento ao estudo da resistência ao DMA, os provetes foram utilizados na realização do estudo petrográfico, tratado na secção 3.3.1, e no estudo das suas características físicas, abordado na secção 3.3.2.

## **3.4 - Resultados obtidos e análise**

### **3.4.1 - Petrografia inicial dos materiais**

Nesta secção apresentam-se os resultados do estudo macro e micropetrográfico das amostras virgens dos dois agregados reciclados, o  $AB_{RCD}$  e o ASIC, e dos dois agregados naturais, o basalto e o calcário.

No estudo petrográfico efetuado foram utilizados os meios e adotados os procedimentos oportunamente descritos na secção 3.3.1.

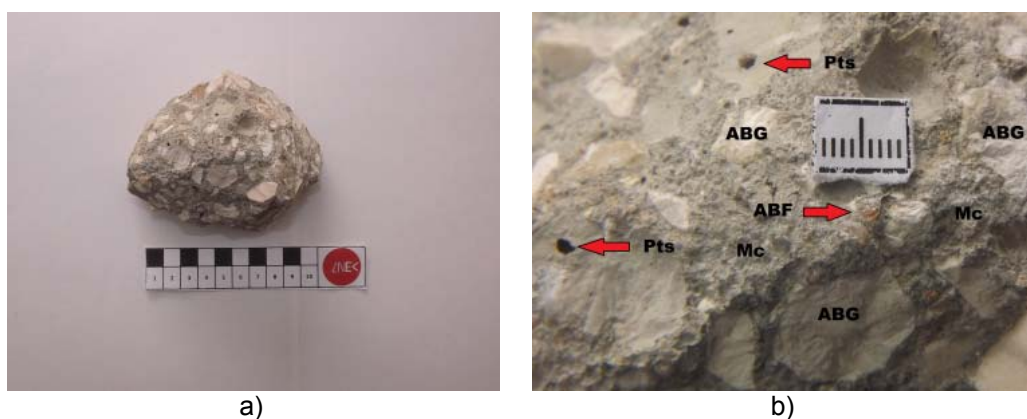
As propriedades petrográficas dos quatro materiais correspondentes a esta fase serão utilizadas como referência na análise das propriedades petrográficas dos mesmos materiais depois de submetidos aos ensaios de DMA. Esta análise comparativa, apresentada na secção 3.4.4, visa aferir possíveis modificações nas referidas propriedades e, tal como afirmado anteriormente, utilizar a informação adquirida na interpretação dos resultados obtidos nos ensaios efetuados para o estudo das propriedades físicas e da durabilidade dos materiais.

#### **3.4.1.1 - $AB_{RCD}$**

Na tabela 3.14 apresentam-se as análises macro e micropetrográfica efetuadas de provetes da amostra de  $AB_{RCD}$ . As figuras 3.46 e 3.47 mostram, respetivamente, os aspetos macro e microscópico do material, complementando a descrição apresentada na tabela 3.14.

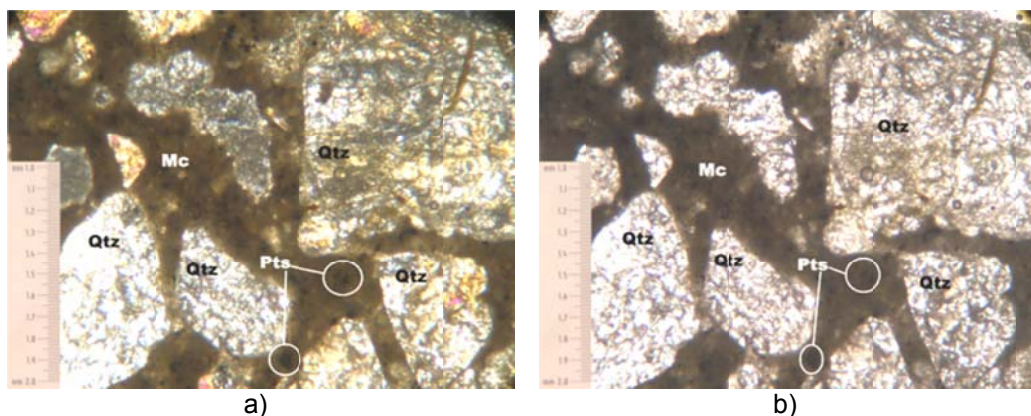
**Tabela 3.14** Análise petrográfica do AB<sub>RCD</sub>

Descrição macroscópica	
•	Material multifásico, heterogéneo, não friável, e sem fissuração ou indícios de desagregação.
•	<b>Matriz:</b> Cimentícia, porosa (presença de alguns poros de dimensões ≤3 mm que se encontram dispersos de modo heterogéneo) e de cor cinzenta clara. Alguns dos poros apresentam-se preenchidos por uma fina camada de um material de cor branca de natureza não identificada.
•	<b>Agregados:</b> Naturais, britados, de duas dimensões, grossa e fina, dispersos na matriz cimentícia. <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Agregados grossos:</b> Abundantes e de dimensões ≤20 mm, são predominantemente calcários e distribuem-se de forma heterogénea na matriz. Apresentam-se compactos ou oolíticos, irregulares (em virtude do processo de britagem a que foram submetidos), de cor branca a amarelada, e sem indícios de alteração.</li> <li>○ <b>Agregados finos:</b> São visíveis em amostra de mão, contudo, a sua natureza não é distinguível a olho nu. Apresentam uma distribuição heterogénea no corpo do provete.</li> </ul>
•	<b>Zona de transição (interface matriz-agregados):</b> Não são visíveis sinais de alteração.
•	<b>Alteração:</b> Em amostra de mão não são visíveis sinais de alteração.
Descrição microscópica	
•	Material de estrutura complexa, composta por três fases distintas: (1) matriz cimentícia; (2) agregado; e (3) zona de transição. Cada uma das fases anteriormente enumeradas é de natureza multifásica.
•	<b>Matriz</b> Apresenta uma cor castanha. São identificados diversos pontos de cor preta, possivelmente associados a poros ou a zonas de ar aprisionado/incorporado. Estes distribuem-se heterogeneamente pela matriz, sendo que os de reduzida dimensão, até 0,01 mm, são geralmente circulares, enquanto que os de maiores dimensões, até 0,05 mm, apresentam uma forma irregular. Não se verifica qualquer relação entre a sua localização e a das partículas dos agregados grosso e fino.
•	<b>Agregados:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Agregados grossos:</b> Em lâmina delgada não se observa a mineralogia associada aos agregados naturais britados grossos, de natureza calcária, dado estes apresentarem uma espessura, em lâmina, superior à que permite a observação. Tal resulta dos materiais que compõem o AB<sub>RCD</sub>, nomeadamente a argamassa e o calcário, apresentarem diferente dureza, e por essa razão os seus comportamentos durante a fase de polimento da lâmina são distintos. Como resultado, a lâmina não apresenta uma espessura uniforme.</li> <li>○ <b>Agregados finos:</b> Os agregados naturais britados finos correspondem a areias quartzíticas em resultado da presença de cristais de quartzo dispersos na matriz cimentícia. Os cristais de quartzo apresentam uma forma anédrica a subédrica e dimensões e cor de polarização variáveis.</li> </ul>
•	<b>Zona de transição (interface matriz-agregados):</b> Não é clara a existência de uma mudança de cor da matriz na zona de transição.
•	<b>Alteração:</b> Não são visíveis sinais de alteração na lâmina delgada AB <sub>RCD</sub> observada.
•	<b>Particularidades:</b> O facto de alguns cristais de quartzo apresentarem cores de polarização variáveis indicia uma inadequada espessura da lâmina delgada AB <sub>RCD</sub> para a sua correta observação ao microscópio petrográfico. Esta particularidade condicionou a análise microscópica realizada sobre a lâmina delgada AB <sub>RCD</sub> .



Legenda: Agregado Britado Fino - ABF; Agregado Britado Grosso - ABG; Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts

**Figura 3.46** Aspeto macroscópico do provete AB<sub>RCD</sub>: a) vista geral; b) vista pormenorizada



Legenda: Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts; Quartzo - Qtz

**Figura 3.47** Microfotografias da lâmina delgada AB<sub>RCD</sub>: a) Nicóis Cruzados - NX, com ampliação de 50x; b) Nicóis Paralelos - N//, com ampliação de 50x

Nas secções 2.4.1.5.2 e 2.4.1.5.3 relativas, respetivamente, à caracterização mineralógica e à caracterização geométrica, física e mecânica dos RCD-R apresentam-se algumas informações que corroboram e/ou complementam a análise petrográfica apresentada na tabela 3.14.

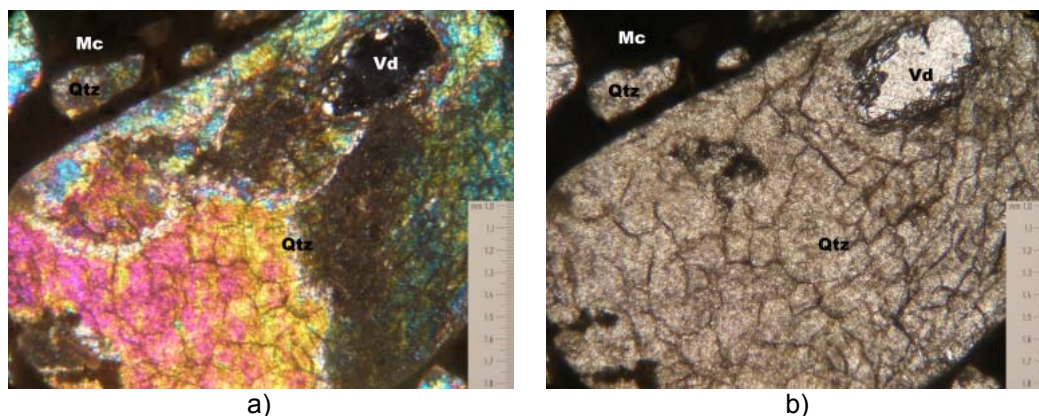
No que respeita à análise macroscópica, também em LNEC (2008) se refere à argamassa e aos agregados naturais como materiais constituintes do AB<sub>RCD</sub>, enquanto que Leite (2001), Jadovski (2005) e FHWA (1997 *in* Leite *et al.*, 2011) apontam a porosidade como uma característica comum da argamassa.

No que concerne à análise microscópica apresentada na tabela 3.14, primeiramente, importa salientar o exposto sobre a cor de polarização dos cristais de quartzo, tendo por objetivo uma melhor compreensão, quer da descrição apresentada da observação da lâmina delgada AB<sub>RCD</sub>, quer da sua comparação com as análises micropetrográficas das lâminas delgadas dos provetes AB<sub>RCD</sub> após utilizados nos ensaios de DMA, em particular das lâminas AB<sub>RCD</sub>\_DMA<sub>I</sub>\_A e AB<sub>RCD</sub>\_DMA<sub>I</sub>\_L.

Em NX, os cristais de quartzo apresentam-se normalmente incolores (Kerr, 1977), assumindo que a lâmina delgada apresenta uma espessura de 0,03 mm (espessura padrão das lâminas utilizadas nas análises microscópicas) e que os cristais de quartzo apresentam um valor de birrefringência (diferença máxima entre os índices de refração máximos e mínimos ( $n_y - n_x$  ou  $n_\epsilon - n_\omega$ ) de um mineral, sendo o índice de refração a razão entre a velocidade de propagação da luz polarizada no vazio e no corpo do mineral) de 0,009 (*ibid.*). Contudo, considerando que a cor de polarização de uma espécie mineral varia em função da espessura da lâmina delgada, da natureza do mineral e da direção de corte do provete utilizado na lâmina delgada (*ibid.*), é expectável que, para uma espessura de lâmina superior a 0,03 mm e para um valor de birrefringência de 0,009, os cristais de quartzo apresentem diferentes cores de polarização.

A situação descrita anteriormente verificou-se na lâmina delgada AB<sub>RCD</sub>, conforme se demonstra na figura 3.48, bem como nas lâminas delgadas AB<sub>RCD</sub>\_DMA<sub>I</sub>\_A e AB<sub>RCD</sub>\_DMA<sub>I</sub>\_L, como mostram respetivamente as figura 3.79 e figura 3.81 apresentadas na secção 3.4.4.1. Nestes casos, além dos cristais de quartzo não apresentarem uma espessura adequada para a sua correta identificação ao microscópio petrográfico, essa espessura é ainda variável ao longo do corpo do mineral na lâmina delgada, dada a variação das cores de polarização.





Legenda: Matriz cimentícia - Mc; Quartzo - Qtz; Vidro da lâmina delgada - Vd

**Figura 3.48** Microfotografias da lâmina delgada AB<sub>RCD</sub>: a) cristal de quartzo com diferentes cores de polarização, em NX com ampliação de 50x; b) cristal de quartzo, em N// com ampliação de 50x

Em segundo, interessa comparar as análises microscópicas realizadas por outros autores. Na secção 2.4.1.5.2 atinente à composição mineralógica dos RCD-R são referenciados estudos desenvolvidos por Limbachiya *et al.* (2006), Vegas *et al.* (2008) e Angulo *et al.* (2009). Com recurso à técnica de DRX, aqueles autores identificaram, essencialmente, a presença de minerais de quartzo e de calcite na composição mineralógica de amostras de AB<sub>RCD</sub>, o que corrobora, em parte, a análise microscópica da lâmina delgada do provete AB<sub>RCD</sub> apresentada na tabela 3.14, dado que a presença de calcite não foi observada, possivelmente, em resultado do descrito na tabela 3.14 sobre os agregados grossos.

### 3.4.1.2 - ASIC

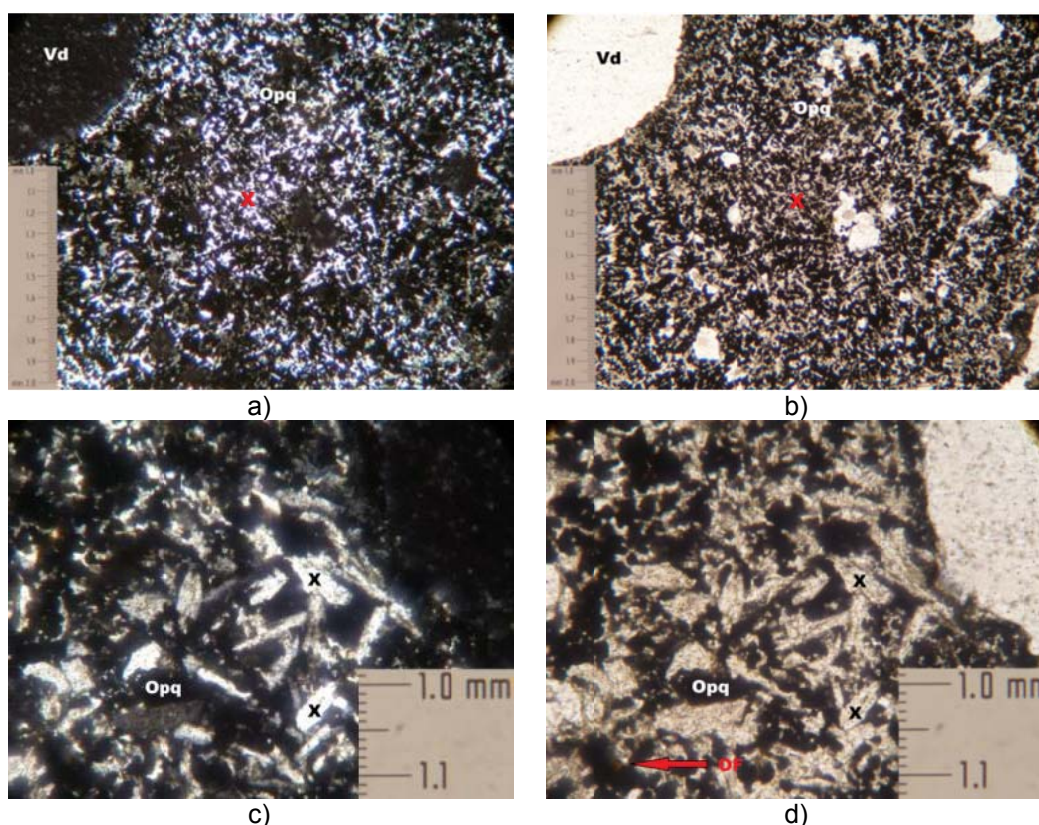
As análises macro e microscópica de provetes da amostra de ASIC são apresentadas na tabela 3.15 e ilustradas, respetivamente, nas figuras 3.49 e 3.50.

**Tabela 3.15** Análise petrográfica do ASIC

Descrição macroscópica
<ul style="list-style-type: none"> <li>Material denso, de textura vesicular, superfície áspera e irregular, e cor negra.</li> <li><b>Minerais:</b> Não observáveis a olho nu.</li> <li><b>Particularidades:</b> É visível a presença de alguns pontos de cor castanha, dispersos heterogeneamente no corpo da amostra, que correspondem a inclusões de partículas de ferro de reduzidas dimensões, aparentemente sem indícios de oxidação.</li> <li><b>Alteração:</b> Em amostra de mão não são visíveis sinais de alteração.</li> </ul>
Descrição microscópica
<ul style="list-style-type: none"> <li>Material de textura afanítica e de granulometria muito fina.</li> <li><b>Matriz:</b> Composta por duas espécies minerais, designadamente minerais opacos e espécie mineral cuja natureza não se identifica ao microscópio petrográfico, dado as suas características microscópicas não se enquadrarem com as dos minerais comumente observados ao referido microscópio.</li> <li><b>Minerais:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Minerais opacos:</b> Parecem sobrepor-se à espécie mineral de natureza não identificada.</li> <li><b>Espécie mineral não identificada:</b> Apresentam uma forma anédrica a acicular, uma cor de polarização branca e uma extinção oblíqua (figuras 3.50c e 3.50d). Não apresenta sinais de fracturação. A forma acicular é identificada apenas em algumas zonas da lâmina delgada ASIC, podendo a espécie mineral em causa confundir-se com a plagioclase.</li> </ul> </li> <li><b>Particularidades:</b> Em N// são identificados diversos pontos de cor castanha-escuro que correspondem, eventualmente, a óxidos de ferro (figura 3.50d).</li> </ul>



**Figura 3.49** Aspeto macroscópico do provete ASIC: a) vista geral; b) vista pormenorizada



Legenda: Óxidos de Ferro - OF; minerais Opacos - Opq; Vidro da lâmina delgada - Vd; espécie mineral não identificada - X

**Figura 3.50** Microfotografias da lâmina delgada ASIC: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x; c) NX com ampliação de 200x; d) N// com ampliação de 200x

Nas secções 2.4.2.5.2 e 2.4.2.5.3 referentes, respetivamente, à caracterização mineralógica e à caracterização geométrica, física e mecânica das escórias de aciaria de FAE processadas apresentam-se algumas informações que corroboram e/ou complementam a análise petrográfica apresentada na tabela 3.15.

No que respeita à análise macroscópica, De Lima (1999), Masuero (2001 *in* Rohde, 2002) e Abu-Eishah *et al.* (2012) partilham do exposto na tabela 3.15 sobre a textura vesicular e a superfície áspera e irregular das escórias de aciaria de FAE processadas, e Abu-Eishah *et al.* (*ibid.*), em particular, apresentam fotos macroscópicas onde é visível a presença de diversos pontos castanhos, que os autores pressupõem corresponder a inclusões de partículas de ferro no corpo da escória.

Contudo, contrariamente ao observado com o provete ASIC, as partículas de ferro apresentavam sinais de oxidação.

No âmbito da análise microscópica, é de salientar o estudo desenvolvido por Ferreira (2010) que, conforme descrito na secção 2.4.2.5.2, procedeu à análise mineralógica de amostras de ASIC recolhidas na unidade industrial da SN do Seixal. Para tal, o autor recorreu à técnica de DRX, tendo identificado a presença de wustite, de silicato de cálcio e de ghelenite, informação que complementa a análise microscópica apresentada na tabela 3.15, na medida em que não foi possível a identificação de espécies minerais através do microscópico petrográfico.

### 3.4.1.3 - Basalto

Na tabela 3.16 são apresentadas as análises macro e microscópica efetuadas de provetes da amostra de basalto. As figuras 3.51 e 3.52 complementam as descrições apresentadas na tabela referida, ao mostrarem, respetivamente, os aspetos macro e microscópico do material.

**Tabela 3.16** Análise petrográfica do basalto

Descrição macroscópica	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rocha compacta, melanocrata e com textura afanítica.</li> <li>• <b>Minerais:</b> Não observáveis a olho nu.</li> <li>• <b>Alteração:</b> Em amostra de mão não são visíveis sinais de alteração, considerando-se, deste modo, o bloco de basalto analisado como uma amostra de rocha sã.</li> </ul>	
Descrição microscópica	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rocha hipocristalina, de textura porfírica, de granulometria fina e constituída por duas fases de cristalização: matriz afanítica com a presença de fenocristais de olivina.</li> <li>• <b>Matriz:</b> Composta por plagioclase, piroxenas, olivina e minerais opacos.</li> <li>• <b>Minerais:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <b>Fenocristais:</b> Os fenocristais de maior dimensão, <math>\leq 2,5</math> mm, são euédricos a subédricos, enquanto que os de menor dimensão, <math>\leq 0,5</math> mm, são sobretudo anédricos. Ambos distribuem-se heterogeneamente pela matriz, apresentam fraturas irregulares e cores de polarização variáveis.</li> </ul> </li> <li>• <b>Alteração:</b> Não são visíveis sinais de alteração nos fenocristais de olivina e nos restantes minerais na lâmina delgada Bas observada.</li> <li>• <b>Particularidades:</b> Da observação da lâmina delgada Bas constata-se que a mesma se encontra pouco nítida (algo "baça"), devendo-se, este facto, ao processo de execução da lâmina, provavelmente, a um polimento insuficiente.</li> </ul>	



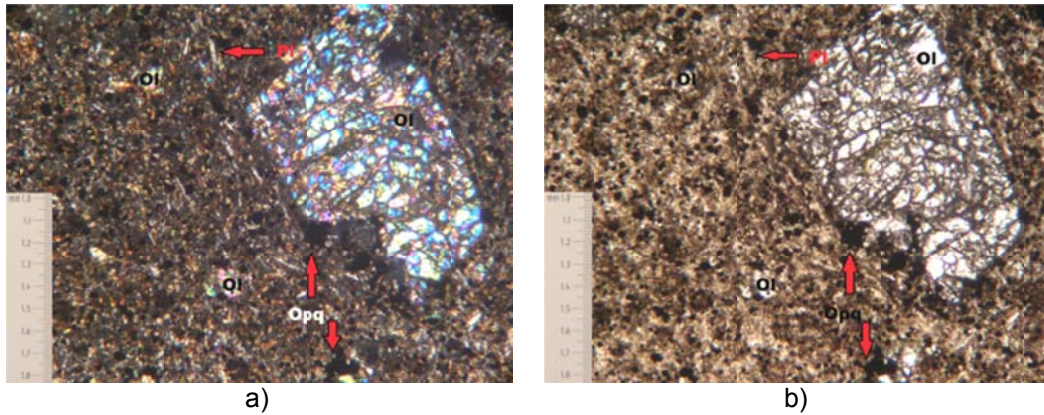
a)



b)

**Figura: 3.51** Aspeto macroscópico do provete Bas: a) vista geral e b) vista pormenorizada





Legenda: Olivina - Ol; minerais Opacos - Opq; Plagioclase - Pl

**Figura 3.52** Microfotografias da lâmina delgada Bas: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x

#### 3.4.1.4 - Calcário

As análises macro e microscópica de provetes da amostra de calcário são apresentadas na tabela 3.17 e ilustradas, respetivamente, nas figuras 3.49 e 3.50.

**Tabela 3.17** Análise petrográfica do calcário

Descrição macroscópica
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rocha compacta a oolítica, e de cor branca a amarelada.</li> <li>• <b>Minerais:</b> A olho nu observa-se a presença de veios e nódulos esféricos de calcite.</li> <li>• <b>Alteração:</b> Em amostra de mão não são visíveis sinais de alteração, considerando-se, deste modo, o bloco de calcário analisado como uma amostra de rocha sã.</li> </ul>
Descrição microscópica
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Matriz:</b> Composta por calcite, elementos cimentados e restos fossilíferos.</li> <li>• <b>Elementos cimentados:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Oólito:</b> Elemento esferoidal cujo diâmetro pode atingir 0,4 mm, que apresenta um núcleo composto por grãos de quartzo ou calcite.</li> <li>○ <b>Clasto:</b> Elemento mais irregular que o oólito.</li> </ul> </li> <li>• <b>Minerais:</b> Cristais de calcite apresentam-se geralmente anédricos, ainda que, em alguns casos, como o que se observa nas microfotografias apresentadas, a forma seja subédrica. Apresentam duas direções de clivagem e uma cor de polarização branca.</li> <li>• <b>Alteração:</b> Não são visíveis sinais de alteração na lâmina delgada Cal observada.</li> <li>• <b>Particularidades:</b> Da observação da lâmina delgada Cal constata-se que a mesma se encontra pouco nítida (algo "baça"), devendo-se, este facto, ao processo de execução da lâmina, provavelmente, a um polimento insuficiente.</li> </ul>

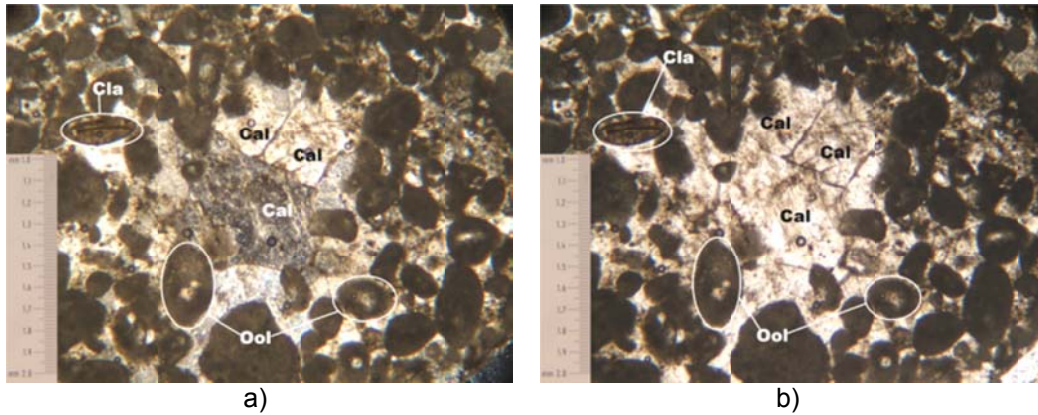


a)



b)

**Figura 3.53** Aspeto macroscópico do provete Cal: a) vista geral e b) vista pormenorizada



Legenda: calcite - Cal; clastos - Cla; oólito - Ool

**Figura 3.54** Microfotografias da lâmina delgada Cal: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x

### 3.4.2 - Características físicas iniciais dos materiais

Nesta secção apresentam-se os resultados da caracterização física dos dois agregados reciclados, o  $AB_{RCD}$  e o ASIC, e dos dois agregados naturais, o basalto e o calcário, antes de serem submetidos aos ensaios de DMA. As propriedades estudadas, conforme referido oportunamente, foram a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$ , a  $P_e$  e o  $w_{max}$ .

Os resultados obtidos são inicialmente apresentados material a material e, em cada caso, comparados com os dados recolhidos em fontes bibliográficas. Em particular, no caso dos dois agregados reciclados, fazem-se algumas considerações sobre a viabilidade técnica da sua utilização em obras de engenharia civil tendo por base as suas propriedades físicas estudadas. Por último, comparam-se os resultados obtidos nos quatro materiais estudados.

Pelas razões referidas na secção 3.4.1 referente à análise petrográfica, também neste caso as propriedades físicas dos materiais virgens foram reavaliadas após a execução dos ensaios de DMA, sendo os resultados analisados na presente secção comparados com os obtidos após os referidos ensaios e que se apresentam na secção 3.4.5.

#### 3.4.2.1 - $AB_{RCD}$

Os resultados do ensaio de caracterização física efetuado sobre provetes da amostra de  $AB_{RCD}$  apresentam-se na tabela 3.18. Para a comparação com estes, a par da informação constante na secção 2.4.1.5.3, resumem-se na tabela 3.19 outros resultados para as mesmas propriedades físicas obtidos em estudos desenvolvidos a nível nacional.

**Tabela 3.18** Valores médios das propriedades físicas iniciais do  $AB_{RCD}$

Provete	$M_{VR}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
$AB_{RCD}$	2,58	2,14	16,88	7,89

**Tabela 3.19** Valores das propriedades físicas de amostras de AB<sub>RCD</sub> obtidos na bibliografia consultada

Autor		Fração granulométrica	M <sub>VR</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	M <sub>VA</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	w <sub>max</sub> (%)
Santos (2002) <sup>1)</sup>	in Gonçalves (2007)	grossa	-	2,33-2,36	4,90-5,50
Santos (2004) <sup>1)</sup>		grossa	-	2,25-2,32	5,50-7,00
Matias (2005) <sup>1)</sup>		grossa	-	2,35	4,12
Evangelista (2007) <sup>1)</sup>		grossa	-	1,91	13,10
Ferreira (2007) (a)	in Alves (2007)	grossa	2,66	2,30	5,80
Gomes (2007) (b)		grossa	2,65	2,45	8,49
LNEC 227 (2008) (a)		31,5 - 63,0 (I)	2,60	2,37	6,70
		4,0 - 31,5 (I)	2,62	2,41	5,80

Legenda: <sup>1)</sup> não é feita referência à norma utilizada; (a) NP EN 1097-6 (2003); (b) NP 581 (1969); (I) mm

Na sua generalidade, os resultados obtidos para a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$  e o  $w_{max}$  com os provetes AB<sub>RCD</sub> são da mesma ordem de grandeza dos valores recolhidos na bibliografia. Para além dos dados apresentados na tabela 3.19, refira-se também que o resultado obtido para o  $w_{max}$  enquadra-se no intervalo de valores apresentados por Jose (2002, Katz, 2003 e Rao, 2005 *in* Rao *et al.*, 2007), Gayarre (2008) e Gómez-Sobero (2002 *in* Martín-Morales *et al.*, 2011): entre 3,00% e 12,00%, para diferentes frações granulométricas de AB<sub>RCD</sub>.

No que respeita à  $P_e$ , os estudos nacionais mostrados na tabela 3.19 não lhe faziam referência, enquanto que, na bibliografia internacional consultada, apenas o estudo desenvolvido por Tam *et al.* (2008) contemplou a sua avaliação. O referido autor avaliou a  $P$  através do método de intrusão de mercúrio em 10 amostras de agregados de betão britado de dimensões inferiores a 20 mm, tendo obtido valores compreendidos entre 13,94% e 20,41%, na qual se enquadra o valor obtido para a  $P_e$  no presente trabalho.

Tendo em conta a classificação proposta por Archie (1952 e Sander, 1967 *in* Rodríguez, 2007) para a porosidade total das rochas carbonatadas, segundo a qual uma rocha apresenta porosidade média ou elevada, se esta variar, respetivamente, entre 8,00% e 16,00% ou entre 16,00% e 32,00%, o AB<sub>RCD</sub> pode ser considerado um agregado de porosidade média a elevada, o que é coerente com o anteriormente mencionado na secção 2.4.1.5.3 e na análise petrográfica apresentada na secção 3.4.1.1. Por se tratarem de conceitos distintos, importa contudo referir que a porosidade total diz respeito aos poros da rocha acessíveis e não acessíveis à água, enquanto a  $P_e$  corresponde aos poros da rocha conectados entre si (Tugrul, 2004). Neste contexto, a  $P_e$  pode ser inferior ou igual à porosidade total, sendo por isso conservativa a classificação utilizada.

A par da análise apresentada, é de todo o interesse, antes de se passar à apresentação e à análise dos resultados dos ensaios de DMA na secção 3.4.3, proceder-se a uma prévia avaliação da adequabilidade do AB<sub>RCD</sub> como material alternativo aos agregados naturais correntemente utilizados em obras de engenharia civil tendo apenas por base as propriedades físicas estudadas. Para o efeito, foi utilizada como referência a classificação proposta por Verhoef e Van de Wall (1998 *in* Gomes, 2001) (tabela 3.20), que resulta da experiência acumulada em casos históricos, pesquisas académicas ou estudos realizados sobre agregados naturais. Este método, ainda que empírico, é de extrema utilidade, quer se pretenda efetuar um prévio paralelismo entre as propriedades físicas dos agregados reciclados e dos agregados naturais, quer se pretenda reforçar a necessidade de se

proceder à realização de ensaios de caracterização física e/ou mecânica ou ao estabelecimento de normas direcionadas especificamente para o estudo de agregados reciclados, em detrimento da simples opção por correlações com os resultados obtidos para agregados naturais.

**Tabela 3.20** Classificação de Verhoef e Van de Wall (1998 *in* Gomes, 2001) para avaliar a qualidade dos agregados naturais

Propriedade	Excelente	Boa	Razoável	Fraca
$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	>2,9	2,6 - 2,9	2,3 - 2,6	<2,3
Absorção de água (%)	<0,5	0,5 - 2,0	2 - 6,0	>6,0
Porosidade (%) (a)	<2,0	2 - 3,0	3 - 4,0	>4,0

Legenda: (a) sem referência ao tipo de porosidade

Da comparação entre os resultados apresentados na tabela 3.18 e na tabela 3.20, conclui-se que o AB<sub>RCD</sub> pertence à categoria de agregados naturais de fraca qualidade segundo uma perspectiva de aplicação em obras de engenharia civil, com a sua  $P_e$  e a sua capacidade de absorção de água elevadas a serem as propriedades que mais contribuem para tal classificação.

### 3.4.2.2 - ASIC

Na tabela 3.21 mostram-se os resultados do ensaio de caracterização física realizado sobre provetes da amostra de ASIC, sendo estes comparados com dados recolhidos na bibliografia e que se apresentam na tabela 3.22.

**Tabela 3.21** Valores médios das propriedades físicas iniciais do ASIC

Proвете	$M_{VR}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
ASIC	3,77	3,28	12,40	3,83

**Tabela 3.22** Valores das propriedades físicas de amostras de escórias de aciaria de FAE processadas obtidos na bibliografia consultada

Autor	$M_{VR}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
<i>Motz e Geiseler (2001)</i> <sup>1)</sup>	3,50	-	-	0,70
<i>Pasetto e Baldo (2010)</i>	3,86 - 3,91 (a)	-	4,09 - 4,66 (b)	-
<i>Sofilic et al. (2010) (c)</i>	3,40	-	-	>1
<i>Chunlin et al. (2011)</i> <sup>1)</sup>	-	3,28 (I)	-	0,96 (I)
	-	3,59 (II)	-	1,20 (II)
<i>Abu-Eishah et al. (2012) (d)</i>	-	3,68	-	0,70
<i>Ducman e Maldenovic (2012) (c)</i>	3,85	3,75	2,60	2,20

Legenda: <sup>1)</sup> não é feita referência à norma utilizada; (a) Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR 64 (1978); (b) CNR 65 (1978); (c) EN 1097-6 (2000); (d) BS 812-2 (1975); (I) fração grossa; (II) fração fina

Conforme se pode observar da comparação entre as duas tabelas anteriores, os valores de  $M_{VR}$  e de  $M_{VA}$  são aproximadamente idênticos, o mesmo não se verificando em relação aos valores de  $P_e$  e de  $w_{max}$ , sendo os obtidos nos ensaios com os provetes ASIC superiores, e em alguns casos muito superiores, aos obtidos pelos autores referenciados na tabela 3.22.

Para uma comparação mais detalhada com os resultados apresentados na tabela 3.21, referem-se outros exemplos bibliográficos nacionais e internacionais.

A nível nacional, refere-se Ferreira (2010) que procedeu à caracterização de escórias de aciaria de FAE processadas recolhidas na unidade industrial da SN do Seixal, ou seja, no local onde se

realizou a amostragem do ASIC ensaiado nesta dissertação. Os valores obtidos pelo referido autor para a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$  e o  $w_{max}$ , respetivamente, 3,31 Mg/m<sup>3</sup>, 2,94 Mg/m<sup>3</sup> e 3,87%, são da mesma ordem de grandeza dos obtidos no presente estudo, tendo o ensaio sido realizado segundo a norma NP 581 (1969).

Dos estudos consultados na bibliografia internacional, salientam-se os realizados por De Lima (1999) e Puy (2007). De Lima (*op. cit.*), ensaiou três frações granulométricas de escórias de aciaria de FAE processadas, 0 mm a 5 mm; 5 mm a 12,5 mm; e 12,5 mm a 20 mm, tendo obtido para a  $M_{VR}$ , respetivamente, 3,63 Mg/m<sup>3</sup>, 3,78 Mg/m<sup>3</sup> e 3,66 Mg/m<sup>3</sup> e para o  $w_{max}$ , respetivamente, 1,00%, 0,89% e 0,83%. Já Puy (*op. cit.*), utilizando o mesmo tipo de material que De Lima (*op. cit.*), obteve na fração <5,6 mm, 3,66 Mg/m<sup>3</sup> e 1,88%, e na fração >5,6 mm, 3,65 Mg/m<sup>3</sup> e 1,28%, respetivamente, para a  $M_{VA}$  e o  $w_{max}$ .

No que diz respeito à  $P_e$ , os resultados obtidos por De Lima (*ibid.*) e Puy (*op. cit.*), apontam para valores compreendidos, respetivamente, entre 3,89% e 4,26%, e entre 4,69% e 6,89%, aproximadamente três vezes inferiores ao valor obtido nos provetes ASIC ensaiados. Deve-se, contudo, salientar que a  $P_e$  das escórias de aciaria de FAE processadas, por um lado, é uma das propriedades físicas mais influenciadas pelo tipo de processamento a que o material é sujeito, devendo por isso ser analisada com algumas reservas e, por outro, o ensaio para a sua determinação pode ser influenciado por algumas condicionantes.

É neste contexto que se insere uma das características do ASIC, já abordada no estudo petrográfico apresentado na secção 3.4.1.2, a textura vesicular. Dependendo do método de ensaio utilizado para a determinação da  $P_e$ , da maior ou menor percentagem de alvéolos presentes na superfície do corpo do provete e da configuração dos alvéolos, pode resultar um valor para a  $P_e$  maior ou menor.

No presente estudo optou-se, como oportunamente mencionado, por realizar os ensaios de caracterização física segundo o procedimento descrito em LERO-PE01 (1993). Uma das etapas previstas no ensaio envolve a secagem superficial dos provetes, utilizando-se para tal, um pano limpo e seco. Conhecidas as limitações desta técnica, em particular na secagem dos alvéolos de maior profundidade, é de fácil conclusão que aquando da pesagem da massa saturada dos provetes da amostra de ASIC com as suas faces enxutas (etapa que se segue à secagem superficial do provete), em alguns alvéolos pudesse continuar a existir água, influenciando os resultados finais da pesagem. Sendo o valor da massa saturada dos provetes com as suas faces enxutas diretamente proporcional ao valor da sua  $P_e$  em acordo com a expressão 3.3 apresentada na secção 3.3.2.2.2, a confirmar-se o exposto, o resultado obtido para os provetes ASIC poderá estar sobrestimado.

O disposto no parágrafo anterior aplica-se também à  $M_{VA}$  e ao  $w_{max}$ , dado estas propriedades físicas serem, respetivamente, inversa e diretamente proporcionais ao valor da massa saturada dos provetes com as suas faces enxutas. Assim os valores da  $M_{VA}$  e do  $w_{max}$  que se apresentam na tabela 3.21 poderão estar, respetivamente, sub e sobrestimados.

Por último, tal como realizado na secção anterior dedicada ao  $AB_{RCD}$ , comparou-se os dados apresentados nas tabelas 3.20 e 3.21, tendo-se concluído que o ASIC, tanto pode ser classificado

como um agregado de excelência, tendo em conta a sua densidade elevada, como um agregado de fraca qualidade, em virtude do seu valor de  $P_e$ .

### 3.4.2.3 - Basalto

Na tabela 3.23 apresentam-se os resultados do ensaio de caracterização física efetuado com os provetes preparados a partir da amostra de basalto, sendo estes comparados com alguns dados consultados na bibliografia e que se apresentam na tabela 3.24.

**Tabela 3.23** Valores médios das propriedades físicas iniciais do basalto

Proвете	$M_{VR}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
<b>Bas</b>	3,02	3,00	0,45	0,14

**Tabela 3.24** Valores de propriedades físicas de amostras de basalto obtidos na bibliografia consultada

Autor	$M_{VR}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
<b>Gupta e Rao (2000) (a)</b>	-	2,96 ( $w_1$ )	0,64 ( $w_1$ )	-
	-	2,61 ( $w_4$ )	29,52 ( $w_4$ )	-
<b>Moon e Jayawardane (2004) (b)</b>	2,82±0,05 ( $w_1$ )	2,81±0,05 ( $w_1$ )	0,32±0,13 ( $w_1$ ) (+)	0,0±0,0 ( $w_1$ )
	2,10±0,07 ( $w_4$ )	1,54±0,04 ( $w_4$ )	25,39±1,78 ( $w_4$ ) (+)	43,0±9,0 ( $w_4$ )
<b>Tugrul (2004) <sup>1)</sup></b>	-	2,57-2,84 ( $w_1$ )	0,39-3,49 ( $w_1$ )	<1,5 ( $w_1$ )
	-	1,85-2,39 ( $w_4$ )	18,60-48,06 ( $w_4$ )	>6,5 ( $w_4$ )
<b>Wu et al. (2007) <sup>1)</sup></b>	2,85	-	0,24 (+)	0,68

Legenda: <sup>1)</sup> não é feita referência à norma utilizada; (a) ISRM (1981); (b) New Zealand Standards - NZS 4402 (1986); ( $w_1$ ) basalto no estado são; ( $w_4$ ) basalto completamente alterado; (+) sem referência ao tipo de porosidade

Os resultados da caracterização física obtidos para os provetes Bas são da mesma ordem de grandeza dos apresentados na tabela 3.24, considerando, em particular, os referentes ao basalto no estado são como os obtidos por Gupta e Rao (2000), Moon e Jayawardane (2004) e Tugrul (2004), coerência que confirma a análise petrográfica apresentada na secção 3.4.1.3, na qual se refere que a amostra de basalto a partir da qual se preparou a lâmina delgada não apresentava sinais evidentes de alteração.

Procedendo-se também à comparação entre os resultados apresentados na tabela 3.23 e na tabela 3.20, à semelhança do realizado para os dois agregados reciclados nas duas secções anteriores, conclui-se que o basalto estudado pertence à categoria de agregados naturais de excelente qualidade segundo uma perspetiva de aplicação em obras de engenharia civil.

### 3.4.2.4 - Calcário

Os resultados do ensaio de caracterização física efetuado sobre provetes preparados a partir da amostra de calcário resumem-se na tabela 3.25. e são comparados com alguns dados consultados na bibliografia apresentados na tabela 3.26.

**Tabela 3.25** Valores médios das propriedades físicas iniciais do calcário

Provete	$M_{VR}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
Cal	2,72	2,58	5,40	2,20

**Tabela 3.26** Valores das propriedades físicas de amostras de calcário obtidos na bibliografia consultada

Autores	$M_{VR}$ (x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
<b>Jeremias (2000) (a)</b>	-	2,49	12,90 (b)	1,17
<b>Tugrul (2004) <sup>1)</sup></b>	-	2,62-2,64	0,75-1,88	0,26-0,60
	-	2,55-2,57	3,75-4,37	0,93-1,58
<b>Gupta e Ahmed (2007) (c)</b>	-	2,53-2,81	2,52-11,90 (+)	0,19-1,39
<b>Yagiz (2010) (c)</b>	-	2,73±0,03 (2)	0,60±0,27 (1)	0,22±0,10 (2)
	-	2,27±0,10 (3)	9,70±2,20 (2)	4,24±1,14 (3)
	-	2,63±0,08 (4)	0,16±0,10 (3)	0,06±0,04 (4)
<b>Pasetto e Baldo (2010)</b>	2,84 (d)		2,11 (e)	
<b>Chunlin et al. (2011) <sup>1)</sup></b>	-	2,47	-	2,2

Legenda: <sup>1)</sup> não é feita referência à norma utilizada; (a) descrito em Jeremias (2000); (b) ASTM D4404 (1984); (c) ISRM (1981); (d) CNR 64 (1978); (e) CNR 65 (1978); (+) sem referência ao tipo de porosidade; (1) calcário dolomítico composto por micrite, de grão médio a grosso e com a presença de fissuras preenchidas por calcite; (2) calcário branco composto por calcite, de granulometria fina e sem fissuras visíveis; (3) calcário bege composto por calcite, de grão grosseiro e com algumas fissuras preenchidas por calcite

Comparando os resultados obtidos no ensaio de caracterização física dos provetes da amostra de calcário (tabela 3.25), com os dados mostrados na tabela 3.26, observa-se que, genericamente, são concordantes, em particular com os obtidos por Gupta e Ahmed (2007), Yagiz (2010) e Chunlin *et al.* (2011). Ainda assim, tendo como ponto de comparação o observado para o basalto na secção anterior, existe uma maior variação entre os resultados obtidos no presente estudo e os consultados na bibliografia, facto que se deve, fundamentalmente, à maior variabilidade das características dos calcários.

Da comparação entre os resultados da tabela 3.25 e da tabela 3.20, conclui-se que o calcário estudado pertence à categoria de agregados naturais de boa, de razoável e ou de fraca qualidade, segundo uma perspectiva de aplicação em obras de engenharia civil, considerando, respetivamente, os valores de  $M_{VR}$ , de  $w_{max}$  e de  $P_e$ .

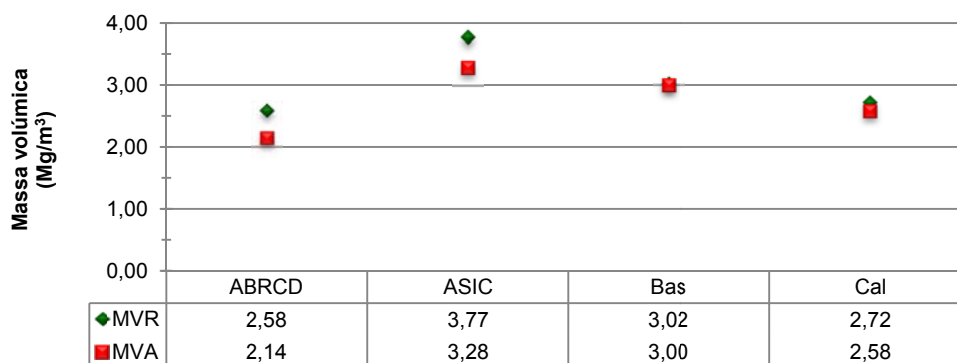
#### 3.4.2.5 - Análise comparativa das características físicas iniciais dos materiais

Na presente secção comparam-se os resultados obtidos para a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$ , a  $P_e$  e o  $w_{max}$  do AB<sub>RCD</sub>, do ASIC, do basalto e do calcário antes de serem submetidos aos ensaios de DMA. De modo a facilitar e melhorar a análise comparativa dos resultados obtidos para cada uma das propriedades físicas estudadas, procedeu-se à sua representação gráfica nas figuras 3.55, 3.56 e 3.57, respetivamente.

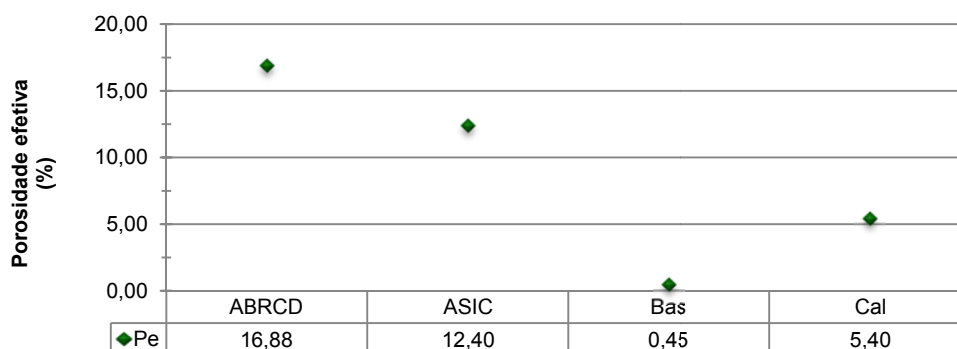
Da comparação entre os resultados projetados nas figuras 3.55 a 3.57 para os dois agregados reciclados, é de salientar, a maior densidade por parte do ASIC, por um lado, e a maior  $P_e$  e  $w_{max}$  do AB<sub>RCD</sub>, por outro. Comparando os resultados obtidos para os quatro materiais estudados, observa-se que o AB<sub>RCD</sub> é o menos denso, mais poroso, e com maior capacidade de absorção de água, o ASIC é o mais denso, e o basalto é o menos poroso e com menor  $w_{max}$ . O calcário, por seu turno, é

caracterizado por apresentar resultados intermédios comparativamente com os restantes três materiais em estudo.

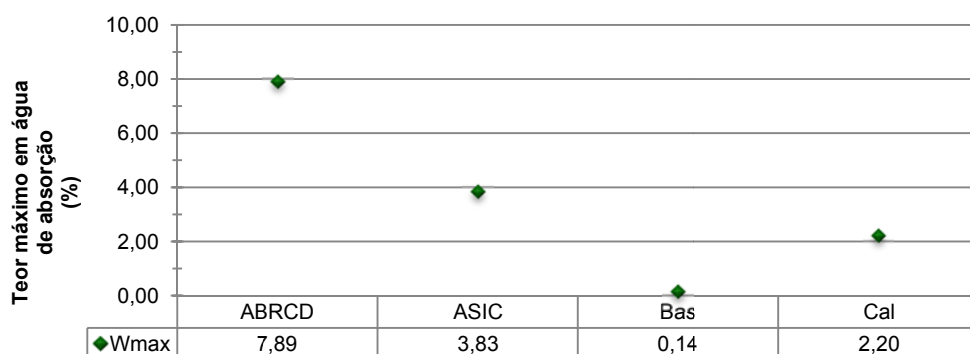
Em termos quantitativos, pode-se concluir que: a) o  $AB_{RCD}$  apresenta-se cerca de 1,2 e 1,5 vezes menos denso que o basalto e o ASIC, respetivamente; b) o  $AB_{RCD}$  é aproximadamente 1,3 vezes mais poroso que o ASIC, 3,1 vezes mais poroso que o calcário e 38 vezes mais poroso que o basalto; e c) o ASIC é cerca de 1,2 vezes mais denso e 27,0 vezes mais poroso que o basalto.



**Figura 3.55** Comparação dos valores médios da  $M_{VR}$  e da  $M_{VA}$  obtidos nos materiais estudados



**Figura 3.56** Comparação dos valores médios da  $P_e$  obtidos nos materiais estudados



**Figura 3.57** Comparação dos valores médios do  $w_{max}$  obtidos nos materiais estudados

Os resultados e consequentes análises comparativas apresentadas nesta secção, por um lado, corroboram as análises petrográficas apresentadas na secção 3.4.1, na medida em que, p. ex., no caso dos agregados reciclados, a sua textura porosa reflete-se nos seus elevados valores de  $P_e$ , ao



passo que no caso particular do provete ASIC, a presença de partículas de ferro no corpo do mesmo confere-lhe uma massa volúmica elevada. Por outro lado, os mesmos resultados podem indiciar uma maior suscetibilidade por parte dos agregados reciclados à degradação do que os agregados naturais, em virtude da maior  $P_e$  e maior capacidade de absorção de água por parte dos primeiros.

### **3.4.3 - Durabilidade dos materiais**

Na presente secção são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de DMA, realizados com o objetivo de se avaliar a durabilidade dos quatro materiais estudados, o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC, o basalto e o calcário, em dois meios aquosos, a água e o lixiviado, sem e com a imersão prévia de 15 dias dos respetivos provetes. Primeiramente apresentam-se os resultados obtidos em água, sem e com imersão prévia dos provetes, e seguidamente no lixiviado. Nos ensaios de DMA com imersão prévia dos provetes, o  $I_d$  foi calculado a partir da massa seca dos provetes correspondente ao final do período de imersão. No final desta secção, procede-se a uma análise comparativa da durabilidade dos quatro materiais.

Em complemento a estes resultados, são apresentados e analisados os valores do pH, do Eh e da C.E. da água e do lixiviado, medidos durante a execução dos ensaios de DMA e dos 15 dias de imersão prévia dos provetes.

Importa referir, pela sua possível influência nos resultados obtidos e nas conclusões retiradas a partir dos resultados, que as segunda e terceira medições foram efetuadas, respetivamente, no início do segundo e do terceiro ciclos de desgaste, e a quarta medição após a conclusão do terceiro ciclo de desgaste, como referido oportunamente na secção 3.3.3.2. Enquanto nas segunda e terceira medições, o meio aquoso já se encontrava estagnado no recipiente em acrílico, e com as partículas desagregadas, inicialmente em suspensão, já sedimentadas, na quarta medição, em virtude do reduzido intervalo de tempo entre a conclusão do terceiro ciclo de desgaste e a medição dos parâmetros, o meio aquoso ainda se encontrava em agitação e as partículas desagregadas em suspensão.

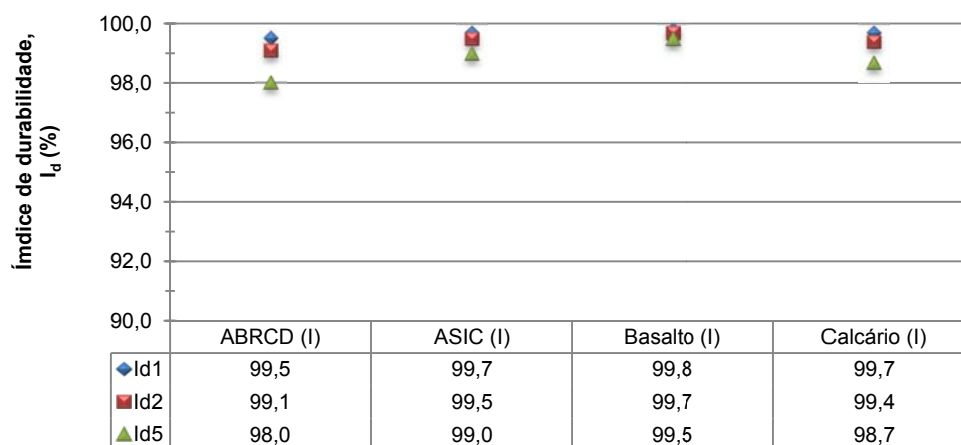
#### **3.4.3.1 - Meio aquoso: água**

##### **3.4.3.1.1 - Sem imersão prévia dos provetes**

###### *a) $I_d$ dos materiais*

Na figura 3.58 são apresentados os valores médios (média dos valores de  $I_d$  obtidos em dois tambores) do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  calculados para o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC, o basalto e o calcário nos ensaios de DMA realizados em água, sem imersão prévia dos provetes. Os resultados obtidos cotejados com a classificação proposta por Gamble (1971), apresentada na tabela 2.45 da secção 2.5.6.2, permitem concluir que os quatro materiais em estudo pertencem à classe dos materiais de durabilidade muito

elevada, qualquer que seja o  $I_d$  considerado. Não obstante ao referido, importa salientar que o basalto foi o material que apresentou, nos três ciclos de desgaste, os valores de  $I_d$  mais elevados e o AB<sub>RCD</sub> os mais baixos. Já o ASIC e o calcário apresentaram um desempenho idêntico, em particular nos dois primeiros ciclos de desgaste. Com efeito, conclui-se que a durabilidade dos quatro materiais estudados ao fim do terceiro ciclo de desgaste dos ensaios de DMA realizados em água, sem imersão prévia dos provetes, é, por ordem crescente, a seguinte: AB<sub>RCD</sub> < calcário < ASIC < basalto.

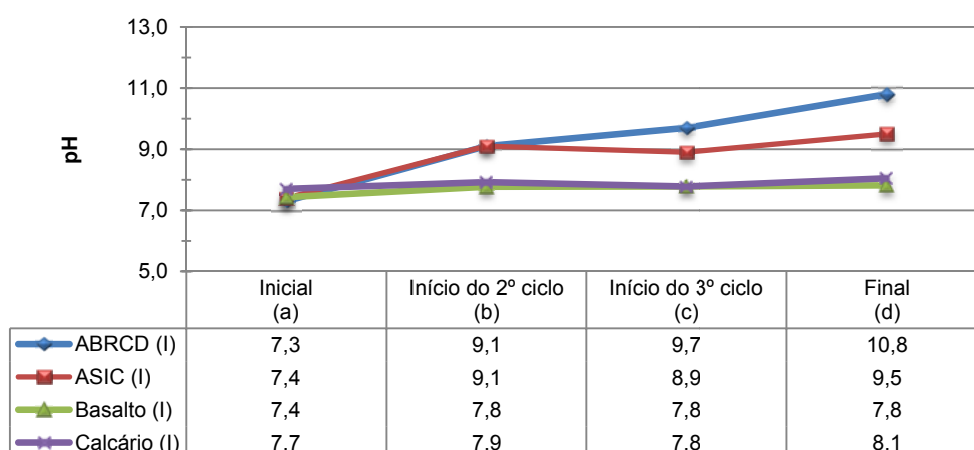


Legenda: (I) \_DMA\_A

**Figura 3.58** Comparação dos valores médios do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados com a água

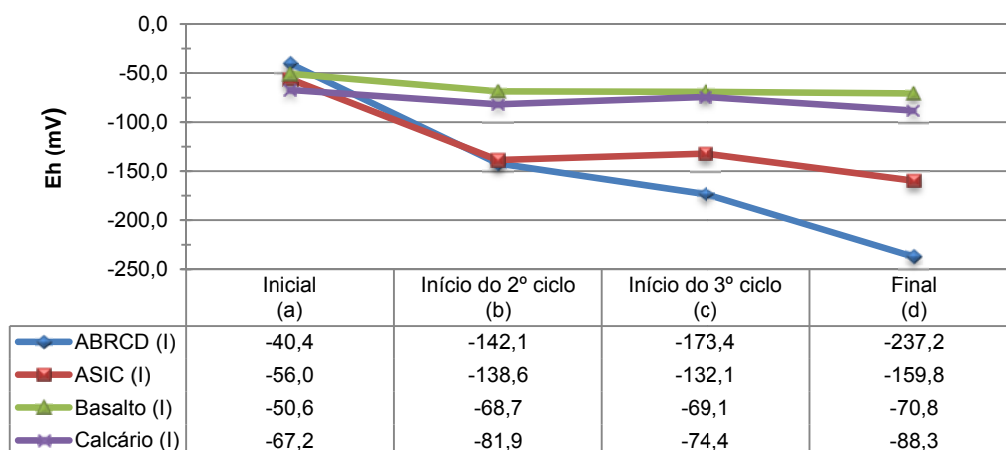
#### b) Parâmetros químicos do meio aquoso

Nas figuras 3.59, 3.60 e 3.61 mostram-se, respetivamente, as variações dos valores médios (média dos valores obtidos em duas medições) do pH, do Eh e da C.E. medidos na água dos ensaios de DMA realizados com os provetes de AB<sub>RCD</sub>, de ASIC, de basalto e de calcário.



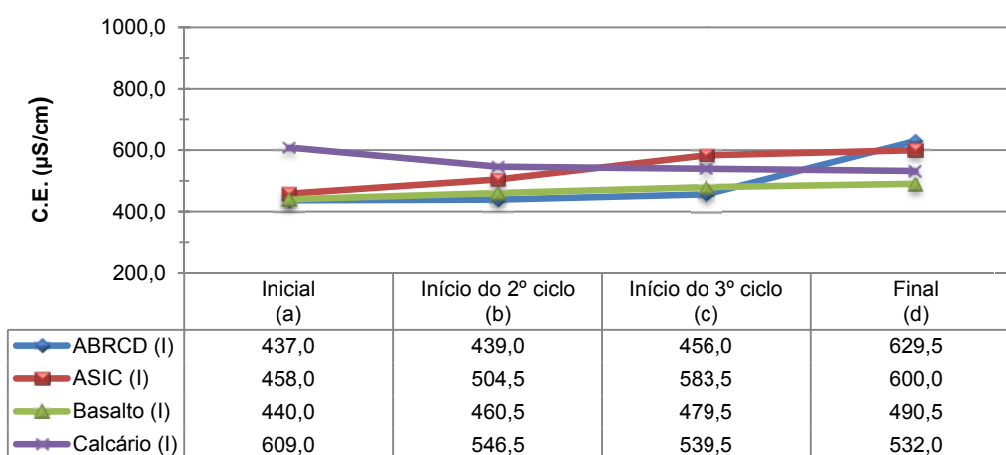
Legenda: (I) \_DMA\_A; (a) água; (b) 24±2 h após o 1º ciclo; (c) 24±2 h após o 2º ciclo; (d) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.59** Variação dos valores médios do pH da água durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados



Legenda: (I) \_DMA\_A; (a) água; (b) 24±2 h após o 1º ciclo; (c) 24±2 h após o 2º ciclo; (d) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.60** Variação dos valores médios do Eh da água durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados



Legenda: (I) \_DMA\_A; (a) água; (b) 24±2 h após o 1º ciclo; (c) 24±2 h após o 2º ciclo; (d) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.61** Variação dos valores médios da C.E. da água durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados

As curvas apresentadas na figura 3.59 mostram variações significativas do pH durante os ensaios de DMA com os dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC. Em ambos os casos, os valores daquele parâmetro aumentaram ao longo do ensaio, evoluindo de 7,3 para 10,8 com o AB<sub>RCD</sub>, e de 7,4 para 9,5 com o ASIC, concluindo-se assim ter ocorrido um aumento da alcalinidade da água durante a interação dinâmica entre esta e os provetes do AB<sub>RCD</sub> e do ASIC. Este aumento pode estar associado, em parte, à dissolução do CaO presente nos dois agregados reciclado, considerando o exposto por Limbachiya *et al.* (2006), em relação ao AB<sub>RCD</sub>, e por Barca *et al.* (2012), em relação ao ASIC.

Face à cinética evidenciada pelas curvas do pH, admite-se ainda que não tenha sido alcançada a estabilização do pH da água até à conclusão dos ensaios de DMA, em particular no caso do AB<sub>RCD</sub>. Contudo, importa lembrar que a última medição do pH, efetuada após o 3º ciclo de desgaste, pode estar de alguma forma influenciada, neste caso sobrevalorizada, pela presença de partículas desagregadas do material ainda em suspensão no meio aquoso.

Na ausência de estudos similares na bibliografia consultada, foram considerados os valores do pH medidos no eluato de ensaios de lixiviação realizados com o mesmo tipo de agregados reciclados estudados como meio de comparação com os resultados obtidos no presente estudo. Os valores do pH do eluato indicados em De Lima (1999), ALT-MAT (2001), Limbachiya *et al.* (2006), Roque *et al.* (2006), *Ingenieurbüro Cornelius Consult* (2007 in UBA, 2008), Pasetto e Baldo (2010) e Sorlini *et al.* (2012) são superiores aos medidos no meio aquoso dos ensaios de DMA realizados. Em ALT-MAT (*op. cit.*), o pH do eluato do AB<sub>RCD</sub> variava entre 12,2 e 12,5, para uma relação L/S=2 e em Limbachiya *et al.* (*op. cit.*), entre 10,4 e 11,2, para uma relação L/S=50. Segundo os restantes autores, o pH do eluato do ASIC variava entre 6,8 e 12,3, para uma relação L/S=10. Deve-se salientar, no entanto, que, para além da granulometria do material utilizado nos ensaios de lixiviação ser mais fina que a utilizada nos ensaios de DMA, a relação entre a quantidade de L e de S nos ensaios de lixiviação e de DMA também é diferente. Nestes últimos foi de L/S=5.

No que concerne aos dois agregados naturais, o basalto e o calcário, o aumento da alcalinidade da água durante os ensaios de DMA foi pouco significativo e, ambos, da mesma ordem de grandeza, 0,4 unidades de pH.

Pelas razões já expostas para os agregados reciclados, também no caso dos agregados naturais as comparações são efetuados com o pH medido no eluato de ensaios de lixiviação. Não tendo sido encontrados estudos de lixiviação com o basalto, só são possíveis comparações com o calcário. Freire *et al.* (2011) realizaram ensaios de lixiviação segundo as normas EN 12457-4:2002 (L/S=10) e EN 1744-3:2002 (L/S=40), tendo obtido, respetivamente, valores de pH de 7,9 e 8,1, os quais são da mesma ordem de grandeza dos obtidos no ensaio de DMA realizado neste trabalho.

O aumento da alcalinidade da água nos ensaios de DMA com o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC foi acompanhado pelo aumento do seu poder redutor (ou seja, aumento da predisposição da água para ceder eletrões ao meio envolvente), como evidencia a figura 3.60, do mesmo modo, que à manutenção do valor do pH nos ensaios de DMA com o basalto e o calcário, correspondeu a manutenção do valor do Eh. O AB<sub>RCD</sub> foi o material que conferiu maior poder redutor ao meio aquoso, com os valores de Eh a variarem entre -40,4 mV e -237,2 mV.

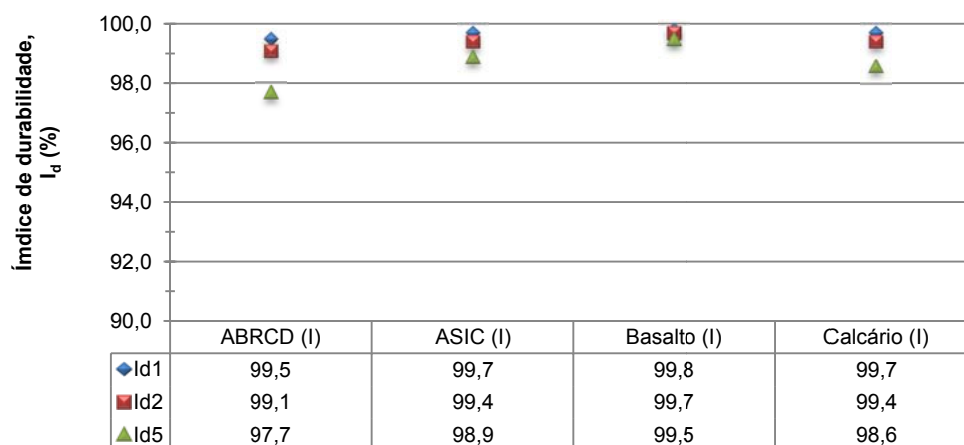
Por último, no que concerne à C.E., com base nos resultados das suas medições expostos no gráfico apresentado na figura 3.61, verifica-se ter ocorrido um aumento do seu valor no decorrer dos ensaios de DMA com o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC e o basalto, sendo este mais significativo nos ensaios realizados com os dois agregados reciclados. O aumento da C.E. da água resulta de um aumento da concentração iónica no meio aquoso devido à migração dos sais solúveis à água existentes nos materiais ensaiados.

Em contraposto à evolução observada durante os ensaios com o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC e o basalto, verificou-se a diminuição dos valores de C.E. no ensaio de DMA com o calcário, devido, contudo, provavelmente a erros ocorridos durante o processo de medição daquele parâmetro ou de fatores externos ao próprio processo de medição, não sendo considerados, como tal, totalmente representativos das reais condições da água no momento do seu controlo.

### 3.4.3.1.2 - Com imersão prévia dos provetes (15 dias)

#### a) $I_d$ dos materiais

Na figura 3.62 são apresentados os valores médios (média dos valores de  $I_d$  obtidos em dois tambores) do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  calculados para o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC, o basalto e o calcário nos ensaios de DMA realizados após a prévia imersão dos provetes em água durante 15 dias. Os resultados obtidos comparados com a classificação de Gamble (1971) mostram que os quatro materiais em estudo pertencem à classe dos materiais de durabilidade muito elevada, independentemente do  $I_d$  considerado, à semelhança do observado na secção 3.4.3.1.1 relativa aos ensaios de DMA realizados em água, sem imersão prévia dos provetes. Também a durabilidade dos quatro materiais ao fim do terceiro ciclo de desgaste dos ensaios de DMA realizados em água, após imersão prévia de 15 dias, segue a sequência observada na secção na secção 3.4.3.1.1: AB<sub>RCD</sub> < calcário < ASIC < basalto, por ordem crescente.



Legenda: (I) \_DMA<sub>I</sub>\_A

**Figura 3.62** Comparação dos valores médios do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados em água, após imersão prévia dos provetes por 15 dias

A avaliação da massa seca dos provetes de AB<sub>RCD</sub>, de ASIC, de basalto e de calcário durante a fase de imersão mostrou que as variações deste parâmetro foram muito pouco significativas.

#### a) Parâmetros químicos do meio aquoso

Os resultados das medições do pH, do Eh e da C.E. da água no decurso da fase de imersão e dos ensaios de DMA com os provetes de AB<sub>RCD</sub>, de ASIC, de basalto e de calcário apresentam-se nas figuras 3.63, 3.64 e 3.65, respetivamente. Conforme oportunamente referido na secção 3.3.3.2, o controlo físico-químico dos dois meios aquosos, neste caso da água, ao longo do período de imersão de 15 dias não foi idêntico em todas as imersões, o que resultou na falta de alguns dados que condicionaram a análise dos resultados apresentados nesta secção.

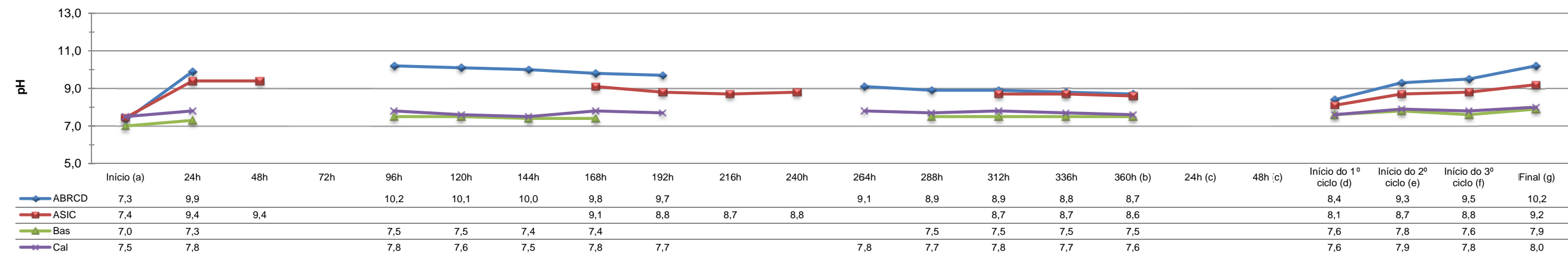
No que respeita ao pH, as curvas representadas na figura 3.63 para a fase de imersão dos quatro materiais em estudo mostram que as variações mais relevantes nos valores do referido parâmetro ocorreram com os provetes de AB<sub>RCD</sub> e de ASIC. Em ambos os casos, verificou-se um aumento inicial do pH nos primeiros dias de imersão, de 7,3 para 10,2 no caso do AB<sub>RCD</sub> após as primeiras 92 h de imersão e de 7,4 para 9,4 no caso do ASIC após as primeiras 24 h de imersão. Este aumento foi procedido de um ligeiro decréscimo, mais acentuado durante a imersão dos provetes AB<sub>RCD</sub> passando o valor do pH de 10,2 para 8,7, e posterior estabilização no final do período de imersão, com os valores do pH a apresentaram-se aproximadamente idênticos nos dois agregados reciclados: 8,7 no AB<sub>RCD</sub> e 8,6 no ASIC. Conclui-se, portanto, que o contacto estático do AB<sub>RCD</sub> e do ASIC com a água contribuiu também para o aumento da alcalinidade daquele meio aquoso, à semelhança do observado durante a interação dinâmica promovida nos ensaios de DMA realizados sem prévia imersão dos provetes.

Durante o período de realização dos ensaios de DMA com os dois agregados reciclados, a medição do pH da água no início do primeiro ciclo de desgaste determinou valores ligeiramente inferiores aos obtidos no último dia de imersão com os provetes daqueles agregados. Já os valores máximos referentes ao final dos ensaios de DMA foram da mesma ordem de grandeza dos máximos obtidos durante o período de imersão e no final dos ensaios de DMA realizados em água, sem imersão prévia dos provetes.

No que concerne aos dois agregados naturais, verificou-se um ligeiro aumento do pH de 7,0 para 7,5 nas primeiras 96h de imersão dos provetes de basalto, e de 7,5 para 7,8 nas primeiras 24h de imersão dos provetes de calcário, seguido, em ambos os casos, da sua estabilização até ao fim do período de imersão. Constata-se, portanto, que durante a imersão dos provetes dos agregados naturais, a água manteve as características neutras iniciais, contrariamente ao observado na imersão dos agregados reciclados.

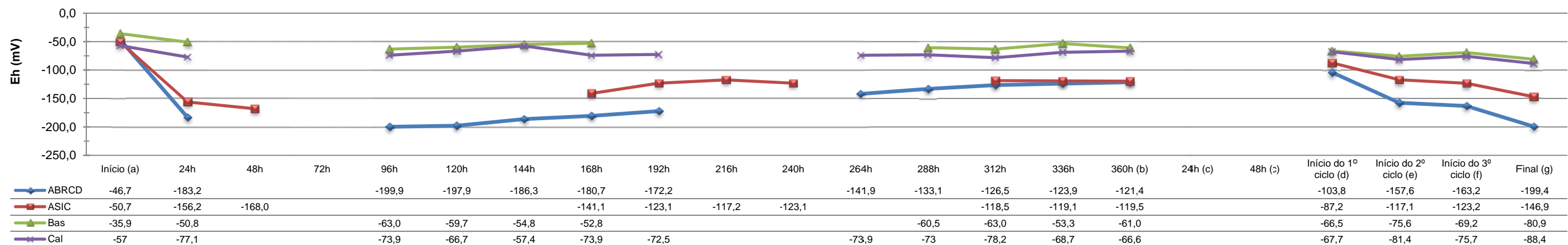
Durante os ensaios de DMA com os provetes dos dois agregados naturais, os valores iniciais do pH da água mantiveram-se idênticos aos medidos no final do período de imersão. Já os valores finais, em ambos os agregados naturais, foram da mesma ordem de grandeza dos valores máximos medidos durante o período de imersão e no final dos ensaios de DMA, sem imersão prévia dos provetes.

Comparando os valores do pH da água medidos durante os ensaios de DMA, sem e com imersão prévia dos provetes dos quatro materiais estudados, conclui-se que: a) o AB<sub>RCD</sub> apresentou-se como o material com maior capacidade para alcalinizar a água; b) os agregados naturais não alteraram significativamente as características neutras do pH inicial da água; c) os valores do pH no final dos ensaios de DMA, sem e com imersão prévia, foram aproximadamente idênticos, excetuando no caso dos provetes de AB<sub>RCD</sub>; e d) ainda que possa não ter sido alcançada a estabilização do pH da água nos ensaios de DMA, sem imersão prévia dos provetes dos agregados reciclados, como referido na secção 3.4.3.1.1, a cinética das curvas observadas para aquele parâmetro nos dois agregados considerados durante a fase de imersão indicia que os valores do pH correspondentes à estabilização do meio não serão substancialmente diferentes dos apresentados na secção 3.4.3.1.1.



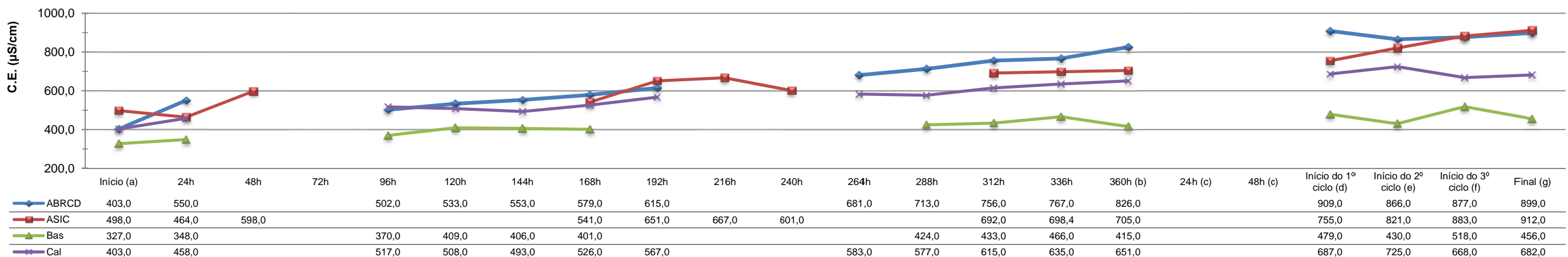
Legenda: (a) água; (b) 15º dia - fim de imersão; (c) após a fase de imersão; (d) 72 h após a fase de imersão; (e) 24 h após o 1º ciclo; (f) 24 h após o 2º ciclo; (g) 1h±30 min após o 3º ciclo

Figura 3.63 Variação do pH da água durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA



Legenda: (a) água; (b) 15º dia - fim de imersão; (c) após a fase de imersão; (d) 72 h após a fase de imersão; (e) 24 h após o 1º ciclo; (f) 24 h após o 2º ciclo; (g) 1h±30 min após o 3º ciclo

Figura 3.64 Variação do Eh da água durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA



Legenda: (a) água; (b) 15º dia - fim de imersão; (c) após a fase de imersão; (d) 72 h após a fase de imersão; (e) 24 h após o 1º ciclo; (f) 24 h após o 2º ciclo; (g) 1h±30 min após o 3º ciclo

Figura 3.65 Variação da C.E. da água durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA





Tal como verificado com o pH, também no caso do Eh, é do contacto da água com os provetes de AB<sub>RCD</sub> e de ASIC que resulta a maior variação nos valores deste parâmetro químico. Além do exposto, observa-se também, à semelhança do ensaio de DMA, sem imersão prévia, que o AB<sub>RCD</sub> é o material que confere maior poder redutor à água, com os valores de Eh variado entre -183,2 mV e -199,9 mV, na fase de imersão, e entre -103,8 mV e -199,4 mV, durante o ensaio de DMA, seguido do ASIC, e dos dois agregados naturais. De um modo geral pode afirmar-se que os valores do Eh no final do terceiro ciclo de desgaste se aproximaram dos valores máximos observados na fase de imersão, em coerência com o registado para o pH.

No que respeita à C.E. da água, esta aumentou durante o período de imersão de todos os provetes, com a variação mais expressiva a ocorrer com os provetes de AB<sub>RCD</sub>, 423 µS/cm, e a menos expressiva com os provetes de basalto, 88 µS/cm, indiciando que a maior transferência de sais solúveis para a água foi com o AB<sub>RCD</sub> e a menor com o basalto. Na água de imersão dos provetes de ASIC e de calcário, o aumento da C.E. foi de ordem de grandeza semelhante, 207 µS/cm e 248 µS/cm, respetivamente.

Nos ensaios de DMA, o valor inicial da C.E. da água era ligeiramente superior ao medido no final da fase de imersão para todos os materiais, tendo-se mantido aproximadamente constante ao longo dos três ciclos de desgaste, com exceção do ensaio realizado com o ASIC, em que houve um aumento de 755 µS/cm, no início do ensaio de DMA, para 912 µS/cm, no final do ensaio. Estes valores podem traduzir que foi alcançado o equilíbrio da C.E. da água nos ensaios com os provetes de AB<sub>RCD</sub>, de basalto e de calcário e que no ensaio com os provetes de ASIC se continua a verificar a migração de sais solúveis do ASIC para aquele meio aquoso.

Comparativamente com os valores finais da C.E. da água nos ensaios de DMA, sem imersão prévia, observa-se que para os agregados reciclados os valores finais da C.E. são mais elevados em 312 µS/cm no ASIC e em 269 µS/cm no AB<sub>RCD</sub>. Nos agregados naturais verifica-se que para o basalto os valores finais da C.E. são de ordem de grandeza semelhante. No caso do calcário, a possibilidade dos valores de C.E. medidos no ensaio de DMA, sem imersão prévia, não estarem corretos inviabiliza qualquer comparação.

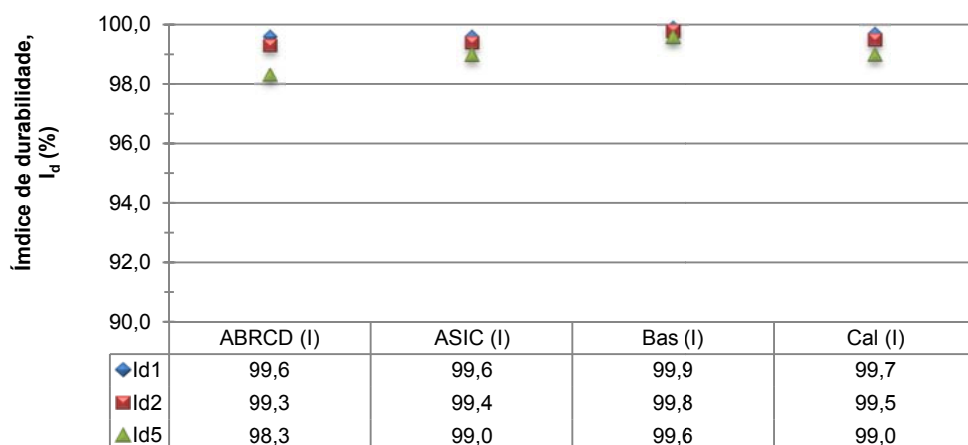
#### **3.4.3.2 - Meio aquoso: lixiviado**

##### **3.4.3.2.1 - Sem imersão prévia dos provetes**

###### *a) $I_d$ dos materiais*

Na figura 3.66 encontram-se projetados os valores médios (média dos valores de  $I_d$  obtidos em dois tambores) do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  calculados para o AB<sub>RCD</sub>, o ASIC, o basalto e o calcário nos ensaios de DMA realizados no lixiviado, sem imersão prévia dos provetes. Os resultados apresentados comparados com a classificação proposta por Gamble (1971) permitem concluir que os quatro materiais em estudo pertencem à classe dos materiais de durabilidade muito elevada,

independentemente do  $I_d$  considerado. Tal como observado a partir dos resultados obtidos no decorrer dos ensaios de DMA em água, sem e com imersão prévia dos provetes, o basalto apresentou os valores de  $I_d$  mais elevados e o  $AB_{RCD}$  os mais baixos. A durabilidade dos quatro materiais ao fim do terceiro ciclo de desgaste do ensaio de DMA realizado com o lixiviado, sem imersão prévia dos provetes, foi, por ordem crescente, a seguinte:  $AB_{RCD} < \text{calcário} = \text{ASIC} < \text{basalto}$ .

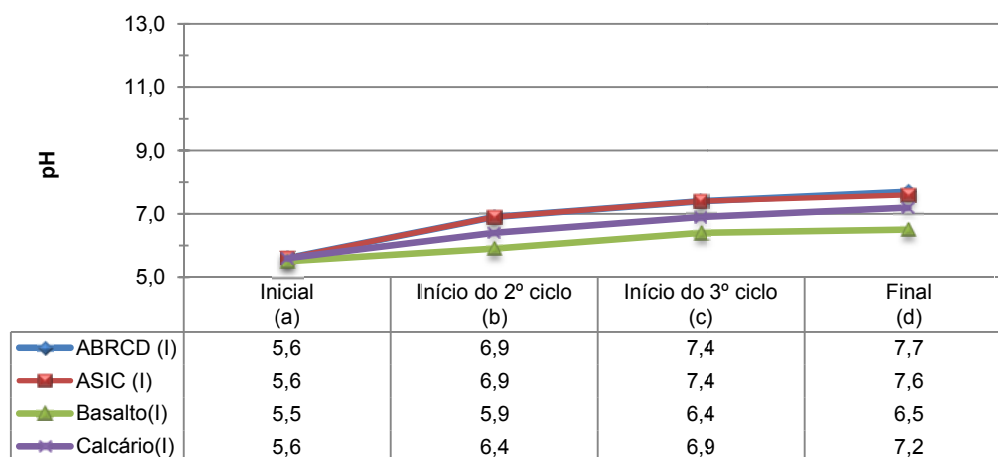


Legenda: (I) \_DMA\_L

**Figura 3.66** Comparação dos valores médios do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados com o lixiviado

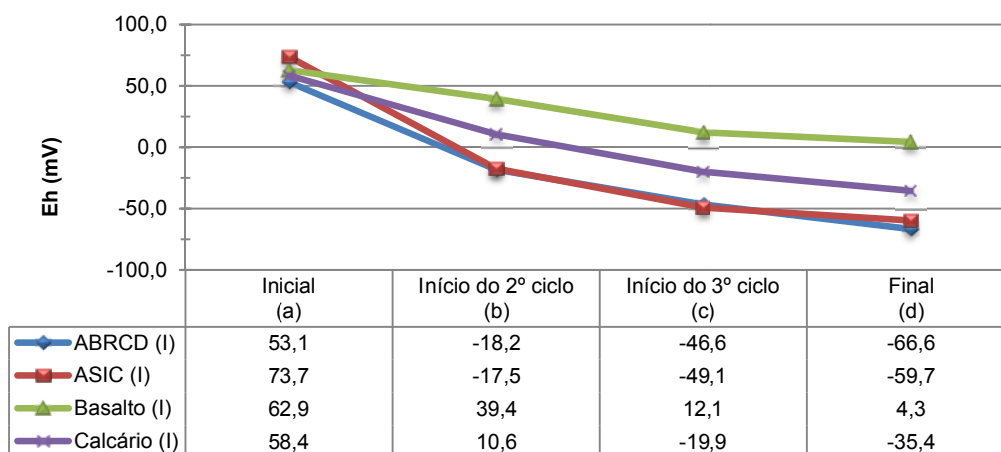
#### b) Parâmetros químicos do meio aquoso

Nas figuras 3.67, 3.68 e 3.69 são apresentados, respetivamente, as variações dos valores médios (média dos valores obtidos em duas medições) do pH, do Eh e da C.E. medidos no lixiviado dos ensaios de DMA realizados com os provetes de  $AB_{RCD}$ , de ASIC, de basalto e de calcário.



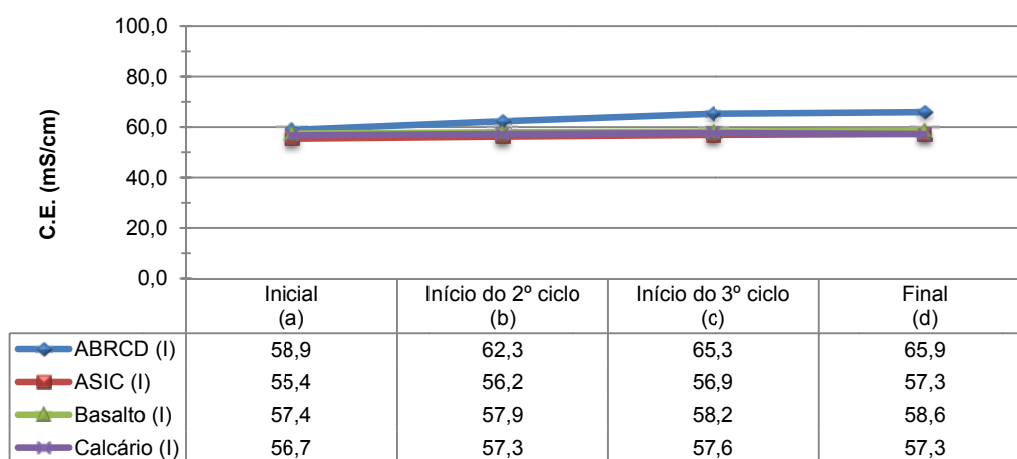
Legenda: (I) \_DMA\_L; (a) lixiviado; (b) 24±2 h após o 1º ciclo; (c) 24±2 h após o 2º ciclo; (d) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.67** Variação dos valores médios do pH do lixiviado durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados



Legenda: (I) \_DMA\_L; (a) lixiviado; (b) 24±2 h após o 1º ciclo; (c) 24±2 h após o 2º ciclo; (d) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.68** Variação dos valores médios do Eh do lixiviado durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados



Legenda: (I) \_DMA\_L; (a) lixiviado; (b) 24±2 h após o 1º ciclo; (c) 24±2 h após o 2º ciclo; (d) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.69** Variação dos valores médios da C.E. do lixiviado durante os ensaios de DMA com os quatro materiais estudados

Nas curvas apresentadas na figura 3.67, observa-se que as variações do valor do pH do lixiviado no decurso dos ensaios de DMA foram mais significativas nos dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, e no calcário. Os valores daquele parâmetro evoluíram no sentido ascendente, de 5,6 para 7,7 no AB<sub>RCD</sub>, de 5,6 para 7,6 no ASIC e de 5,6 para 7,2 no calcário, concluindo-se assim, que com o decorrer da interação dinâmica entre o lixiviado e os provetes dos respetivos materiais, promovida durante os ensaios de DMA, o meio aquoso evoluiu de um meio ácido para um meio neutro. No que ao basalto diz respeito, a figura 3.67 mostra que o aumento do pH do lixiviado durante o ensaio de DMA não foi suficiente para se atingir um meio neutro.

Comparando os valores do pH medidos nos ensaios de DMA realizados em água e no lixiviado, sem imersão prévia dos provetes, observa-se que: a) os dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, basicificaram a água e o lixiviado, podendo esta capacidade estar associada à presença de CaO na composição química de ambos os agregados que é dissolvido pelos meios aquosos; b) nos ensaios de DMA realizados em água, o maior valor final do pH do meio aquoso foi obtido durante o

ensaio com os provetes de  $AB_{RCD}$ , ao passo que nos ensaios realizados no lixiviado, o maior valor final do pH foi aproximadamente idêntico nos ensaios com os provetes de  $AB_{RCD}$  e de ASIC, pelo que, a maior capacidade do  $AB_{RCD}$  para basificar a água durante os ensaios de DMA não se confirmou nos ensaios de DMA com o lixiviado; c) a ordenação dos materiais em função dos valores finais do pH (do mais alcalino para o menos alcalino) é idêntica, ou seja,  $AB_{RCD} > ASIC > \text{calcário} > \text{basalto}$ ; d) a amplitude do aumento do valor do pH do meio aquoso ao longo dos ensaios de DMA não foi idêntica nos dois meios aquosos, mas as maiores amplitudes verificarem-se, em ambos os casos, com os agregados reciclados; e e) de acordo com a cinética das curvas do pH resultantes das medições efetuadas durante os ensaios de DMA realizados em água com os provetes de  $AB_{RCD}$  e de ASIC e durante os ensaios de DMA realizados no lixiviado com os provetes de todos os materiais não terá sido alcançada a estabilização do pH do meio aquoso.

O decréscimo da acidez do lixiviado nos ensaios de DMA foi acompanhado de um decréscimo do poder oxidante daquele meio aquoso. A figura 3.68 mostra que no final dos ensaios de DMA o meio era redutor com os provetes de  $AB_{RCD}$ , de ASIC e de calcário e o poder oxidante com os provetes de basalto diminuiu de 62,9 mV para 4,3 mV.

Conforme observado em relação aos valores de Eh medidos durante os ensaios de DMA realizados em água, sem imersão prévia dos provetes, também nos ensaios realizados com o lixiviado, o  $AB_{RCD}$  foi o material que conferiu maior poder redutor ao lixiviado, variando os valores de Eh entre 53,1 mV e -66,6 mV, seguido do ASIC e do calcário.

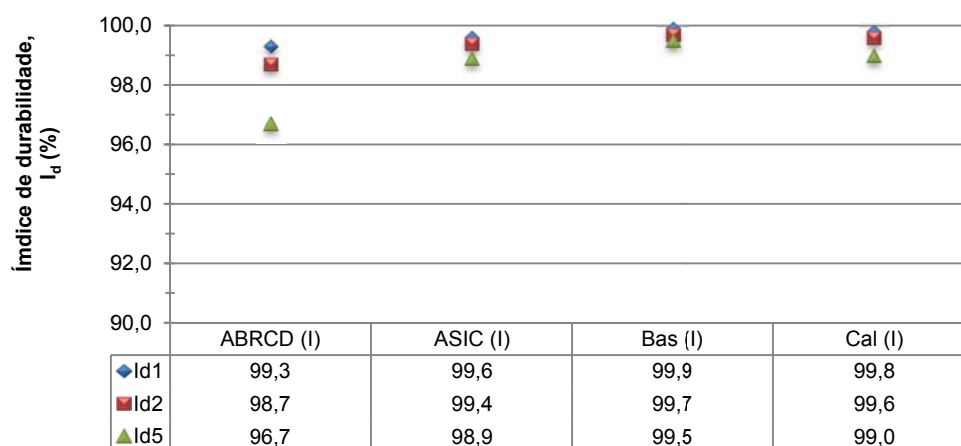
Por último, de acordo com o gráfico apresentado na figura 3.69, verifica-se um ligeiro aumento da C.E. do lixiviado no decurso dos ensaios de DMA realizados com os quatro materiais estudados. A variação mais expressiva ocorreu durante o ensaio com os provetes de  $AB_{RCD}$ , sendo esta aproximadamente de 7 mS, enquanto que, em relação aos restantes materiais, a variação dos valores de C.E. foi de 1,9 mS, 1,2 mS e 0,6 mS com os provetes de ASIC, de basalto e de calcário, respetivamente. A tendência evolutiva evidenciada por estes valores da C.E. reforça assim a análise apresentada nos ensaios de DMA sem imersão prévia, segundo a qual os valores medidos não são totalmente representativos das reais condições da água no momento do seu controlo.

#### **3.4.3.2.2 - Com imersão prévia dos provetes (15 dias)**

##### *a) $I_d$ dos materiais*

Os valores médios (média dos valores de  $I_d$  obtidos em dois tambores) do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  calculados para o  $AB_{RCD}$ , o ASIC, o basalto e o calcário a partir dos ensaios de DMA realizados após a imersão dos provetes no lixiviado durante 15 dias são apresentados na figura 3.70. Da sua comparação com a classificação proposta por Gamble (1971) conclui-se que os quatro materiais estudados pertencem à classe dos materiais de durabilidade muito elevada, qualquer que seja o  $I_d$  considerado. O basalto apresentou os valores de  $I_d$  mais elevados, e o  $AB_{RCD}$  os mais baixos, sendo esta diferença mais acentuada que o verificado nos ensaios de DMA anteriores. A durabilidade dos

quatro materiais ao fim do terceiro ciclo de desgaste dos ensaios de DMA realizados com o lixiviado, após imersão prévia dos provetes por 15 dias, é, por ordem crescente, a seguinte:  $AB_{RCD} < ASIC < \text{calcário} < \text{basalto}$ .



Legenda: \_DMA\_L

**Figura 3.70** Comparação dos valores médios do  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  dos quatro materiais em estudo obtidos nos ensaios de DMA realizados no lixiviado, após imersão prévia dos provetes por 15 dias

A avaliação da massa seca dos provetes  $AB_{RCD}$ , ASIC, Bas e Cal durante a fase de imersão mostrou que as variações deste parâmetro foram muito pouco significativas.

#### a) Parâmetros químicos do meio aquoso

Nas figuras 3.71, 3.72 e 3.73 apresentam-se respetivamente os resultados das medições do pH, do Eh e da C.E do lixiviado no decorrer da fase de imersão e dos ensaios de DMA com os provetes de  $AB_{RCD}$ , de ASIC, de basalto e de calcário. Pelas razões já expostas na secção 3.4.3.1.2, a análise dos resultados aqui apresentados esteve condicionada pela falta de dados referentes a alguns dias do período de imersão.

No que concerne ao pH, as curvas apresentadas na figura 3.71 mostram que as variações mais significativas nos valores do referido parâmetro ocorreram durante a fase de imersão dos agregados reciclados, o  $AB_{RCD}$  e o ASIC. Em ambos os casos, verificou-se um aumento inicial do pH nos primeiros dias de imersão, de 5,6 para 7,5 após 5 dias (120 h) de imersão dos provetes de  $AB_{RCD}$ , e de 5,6 para 7,4 após 7 dias (168 h) de imersão dos provetes de ASIC, sendo este procedido de um período de estabilização. Como tal, conclui-se que o contacto estático do  $AB_{RCD}$  e do ASIC com o lixiviado contribuiu para a diminuição da acidez daquele meio aquoso, à semelhança do observado durante a interação dinâmica promovida nos ensaios de DMA realizados sem prévia imersão dos provetes. Conclui-se, ainda, com base na semelhança entre as curvas do pH nos dois agregados reciclados, que ambos demonstraram idêntica capacidade para influenciar o pH do lixiviado, que evoluiu de um meio ácido para um meio neutro.

Durante o período de realização dos ensaios de DMA com os provetes dos dois agregados reciclados, verificou-se uma ligeira subida do pH do lixiviado. No entanto, quer os valores do pH

medidos no início do primeiro ciclo de desgaste, quer os medidos no final dos ensaios de DMA foram inferiores aos valores do pH medidos no final da imersão.

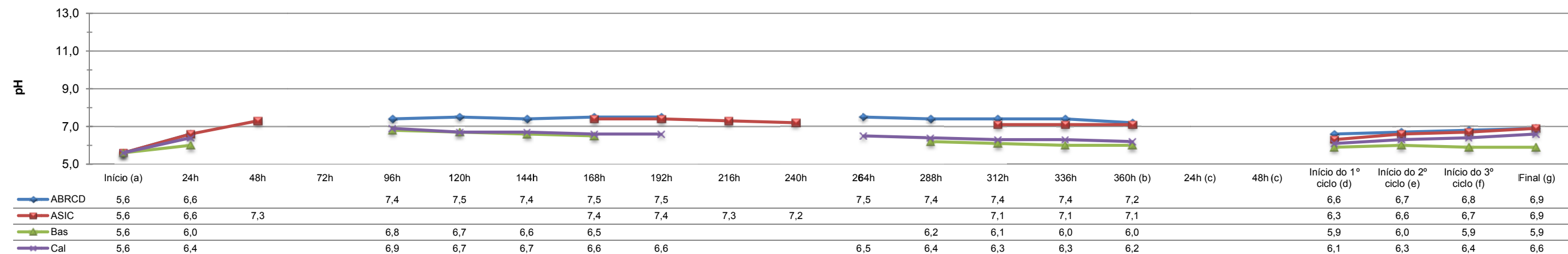
No que respeita aos dois agregados naturais, o basalto e o calcário, verificou-se um ligeiro aumento do pH nas primeiras 96h de imersão dos provetes, respetivamente, de 5,6 para 6,8 e de 5,6 para 6,9, seguido de um ligeiro decréscimo do seu valor, até à estabilização no fim do período de imersão. A semelhança entre as curvas do pH durante a imersão dos provetes de basalto e de calcário demonstram idêntica capacidade dos respetivos materiais em influenciar o pH do lixiviado.

Durante os ensaios de DMA com os dois agregados naturais, os valores do pH mantiveram-se praticamente constantes com os provetes de basalto e aumentaram ligeiramente, de 6,1 para 6,6, com os provetes de calcário.

Comparando os valores do pH do lixiviado medidos durante os ensaios de DMA, sem e com imersão prévia dos provetes dos quatro materiais estudados, conclui-se que: a) os dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, apresentaram-se como os materiais com maior capacidade para neutralizar o lixiviado inicialmente ácido; b) o basalto foi o agregado natural que menos alterou as características iniciais do lixiviado, mantendo-se este como um meio ácido; c) os valores do pH do meio aquoso no final dos ensaios de DMA sem imersão prévia foram superiores aos valores medidos no final dos ensaios de DMA realizados após imersão prévia dos provetes e, na sua generalidade, da mesma ordem de grandeza dos máximos medidos durante a fase de imersão; e d) ainda que possa não ter sido alcançada a estabilização do pH do lixiviado nos ensaios de DMA sem imersão prévia dos provetes dos dois agregados reciclados e do calcário, a cinética das curvas observadas para aquele parâmetro durante a fase de imersão, em particular dos agregados reciclados, indicia que os valores do pH correspondentes à estabilização do meio não serão substancialmente diferentes dos apresentados.

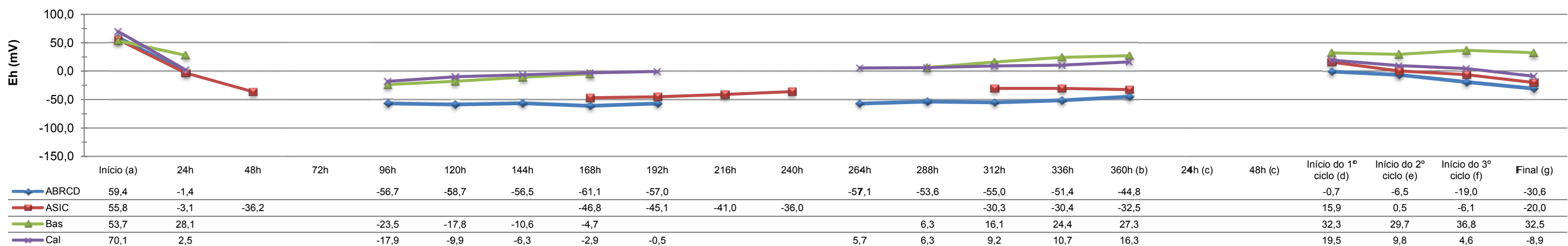
De igual modo ao verificado com o pH, também no caso do Eh, é do contacto do lixiviado com os provetes de AB<sub>RCD</sub> e de ASIC que se observam as variações mais significativa nos valores deste parâmetro químico, com o lixiviado a passar de um meio oxidante para um meio redutor após o primeiro dia de imersão. No caso dos agregados naturais, verifica-se um decréscimo inicial do potencial oxidante do lixiviado, para passar a um meio redutor ao 4º dia (96h). A esta fase seguiu-se uma evolução inversa, com o meio a voltar a apresentar características de oxidante a partir do 11º dia (264h) de imersão. Até ao final do período de imersão, o aumento do poder oxidante foi pouco significativo.

Para além do disposto, observa-se ainda, à semelhança dos ensaios de DMA sem imersão prévia que o AB<sub>RCD</sub> é o material que confere maior poder redutor ao lixiviado, com os valores de Eh a variarem entre 59,4 mV e -61,1 mV, na fase de imersão, e entre -0,7 mV e -30,6 mV, durante o ensaio de DMA, seguido do ASIC, e dos dois agregados naturais. Verificou-se também que, de um modo geral, os valores de Eh medidos no final do terceiro ciclo de desgaste são menos negativos que os valores máximos negativos de Eh na fase de imersão, em coerência com a variação registada para o pH. Excetuando o caso dos ensaios realizados com os provetes de basalto e de calcário, no final do período de imersão, e com os provetes de basalto no final do ensaio de DMA, o lixiviado apresentou características de um meio redutor.



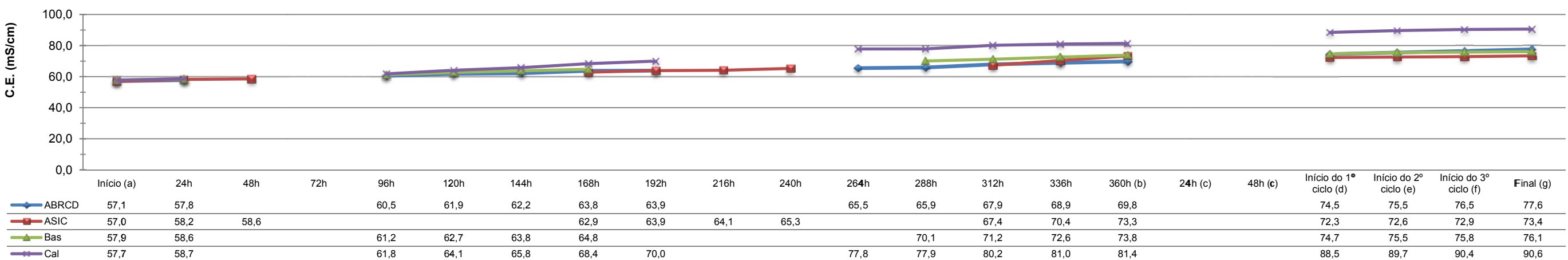
Legenda: (a) lixiviado; (b) 15º dia - fim de imersão; (c) após a fase de imersão; (d) 72 h após a fase de imersão; (e) 24 h após o 1º ciclo; (f) 24 h após o 2º ciclo; (g) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.71** Variação do pH do lixiviado durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA



Legenda: (a) lixiviado; (b) 15º dia - fim de imersão; (c) após a fase de imersão; (d) 72 h após a fase de imersão; (e) 24 h após o 1º ciclo; (f) 24 h após o 2º ciclo; (g) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.72** Variação do Eh do lixiviado durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA



Legenda: (a) lixiviado; (b) 15º dia - fim de imersão; (c) após a fase de imersão; (d) 72 h após a fase de imersão; (e) 24 h após o 1º ciclo; (f) 24 h após o 2º ciclo; (g) 1h±30 min após o 3º ciclo

**Figura 3.73** Variação da C.E. do lixiviado durante o período de imersão e de realização dos ensaios de DMA



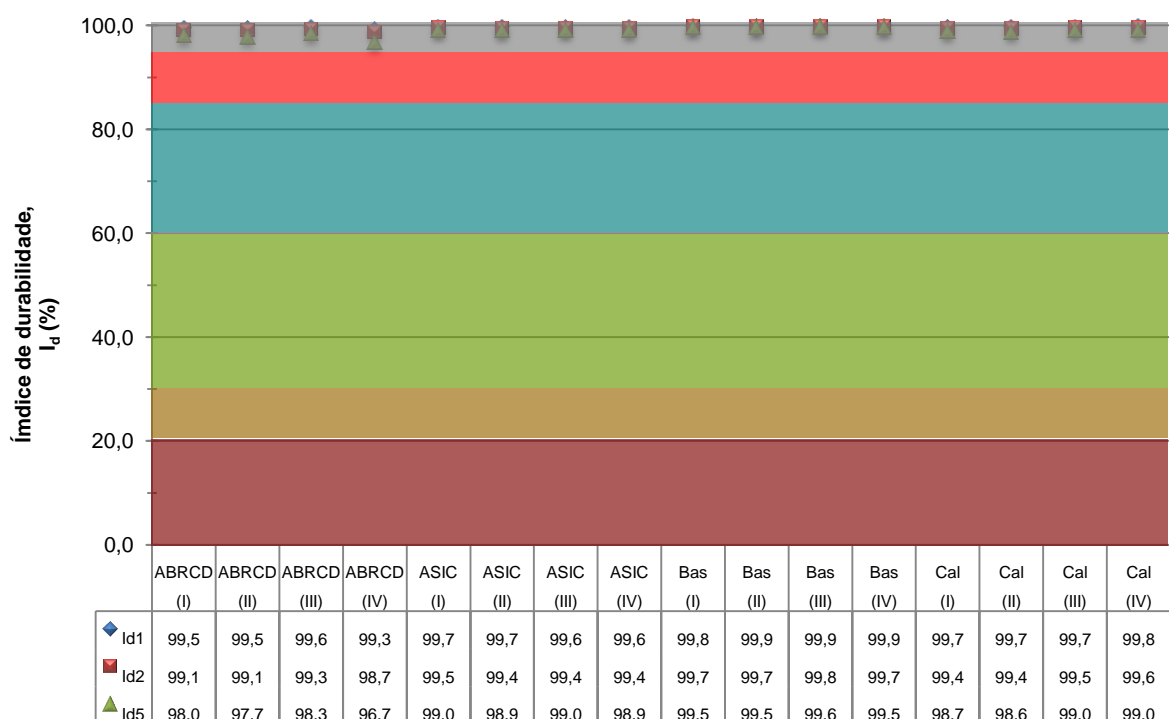


No que concerne à C.E. do lixiviado, esta aumentou durante o período de imersão de todos os provetes, com o maior aumento a ocorrer com o calcário, 23,7 mS/cm. Nos provetes de AB<sub>RCD</sub>, de ASIC e de basalto, o aumento da C.E. do lixiviado foi de ordem de grandeza semelhante, respetivamente, 12,7 mS/cm, 16,3 mS/cm e 15,9 mS/cm. Este aumento do valor de C.E. é explicável em grande parte pela evaporação do lixiviado durante o período de imersão.

Nos ensaios de DMA, os valores da C.E. mantiveram a tendência observada no período de imersão dos provetes. Desta feita, a maior variação dos valores da C.E. observou-se durante o ensaio com os provetes de AB<sub>RCD</sub>, com um aumento de 74,5 mS/cm, no início do primeiro ciclo de desgaste, para 77,6 mS/cm, no fim do terceiro ciclo de desgaste. Pelas mesmas razões anteriormente mencionadas, o aumento de C.E. foi menor durante os ensaios de DMA que na fase de imersão dos provetes.

### 3.4.3.3 - Análise comparativa da durabilidade dos materiais

Na figura 3.74 são apresentados todos os valores obtidos nos ensaios de DMA para o  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  do AB<sub>RCD</sub>, do ASIC, do basalto e do calcário e os limites das classes de durabilidade definidas por Gamble (1971) para os materiais rochosos considerando o  $I_{d5}$ .



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA\_L;  - durabilidade muito elevada;  - durabilidade elevada;  - durabilidade média a elevada;  - durabilidade média;  - durabilidade baixa;  - durabilidade muito baixa

**Figura 3.74** Comparação dos valores obtidos para  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  nos quatro materiais em estudo em relação à classificação de Gamble (1971) para o  $I_{d5}$

Da análise dos resultados apresentados e no seguimento do já concluído nas quatro secções anteriores, verifica-se que todos os valores calculados para o  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  no AB<sub>RCD</sub>, no ASIC, no

basalto e no calcário são superiores a 95,0%, o que, considerando a classificação proposta por Gamble (1971) para cada  $I_d$ , permite concluir que os quatro materiais estudados pertencem à categoria de materiais de durabilidade muito elevada. Os resultados evidenciam que o prolongamento das ações mecânicas, através da realização de mais 600 rotações que o recomendado pelo método da ISRM (1977) e a sujeição dos materiais a condições químicas mais agressivas (contacto com o lixiviado de pH 5,5) e mais prolongadas (imersão prévia dos provetes durante 15 dias), não contribuíram para alterar a classificação dos materiais quanto à sua durabilidade pela classificação de Gamble (*op. cit.*). Demonstram, ainda, que a maior  $P_e$  e  $w_{max}$  evidenciada por parte dos dois agregados reciclados em comparação com os dois agregados naturais estudados não teve influência na durabilidade dos primeiros para as condições de ensaio adotadas.

O concluído não inviabiliza que, comparando os valores obtidos para o  $I_{d5}$ , se ordene os quatro materiais estudados pela seguinte ordem crescente de durabilidade:  $AB_{RCD} < ASIC \cong \text{calcário} < \text{basalto}$ , com a maior diferença percentual entre os valores obtidos para aquele índice a ser de 2,9% e a observar-se entre os provetes  $AB_{RCD\_DMA\_L}$  e  $Bas\_DMA\_L$ . Em termos de massa de material perdida, a este valor percentual terá correspondido, em média, à perda aproximada de 1,4 g de cada provete de  $AB_{RCD}$  em relação aos provetes de basalto.

Considerando apenas o desempenho observado pelo calcário nos ensaios de DMA realizados no presente trabalho não se justificaria a interdição de utilização de brita de origem calcária na camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos prevista no DL nº 183/2009, já referida na secção 2.3.4. Contudo, é conhecido o fenómeno de dissolução dos calcários, havendo por isso que efetuar estudos complementares ao presentemente realizado para avaliação da possibilidade da sua ocorrência nos aterros de resíduos. Importa salientar, no entanto, que os fatores naturais intervenientes nos fenómenos de dissolução do calcário são diferentes dos existentes na camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos, em particular o fator tempo, tanto no que se refere ao tempo em que o meio lixiviante está em contacto com o calcário até ficar saturado de carbonatos, como, em particular, ao tempo de duração dos processos de dissolução e carsificação, que são à escala geológica na natureza e da ordem de algumas dezenas de anos nos aterros de resíduos.

A análise comparativa dos resultados apresentados nesta secção para os dois agregados reciclados com outros dados não foi possível por não terem sido referenciados na bibliografia nacional e internacional consultada estudos idênticos aos apresentados neste trabalho, em particular com betão britado de RCD e com escórias de aciaria de FAE processadas. Alguns autores avaliaram no entanto, o desempenho do  $AB_{RCD}$ , como p. ex. Pestana (2008), e das escórias de aciaria de FAE processadas, como Rohde (2002) e Ferreira (2010), mediante o recurso a outros métodos de caracterização.

No caso de Pestana (*op. cit.*), este efetuou ensaios com amostras de betão britado de RCD para a determinação da sua resistência à fragmentação (segundo a NP EN 1097-2 (2002)) e ao desgaste (segundo a EN 1097-1 (2002)), tendo obtido, respetivamente, 44% para o coeficiente de *Los Angeles* e 48% para o coeficiente micro-Deval. Com base nos dados obtidos, o autor concluiu

que o material estudado era pouco resistente, em coerência com o observado por Alves (2007, *in* Pestana, 2008), segundo o qual, a resistência à fragmentação do AB<sub>RCD</sub> é inferior à dos agregados naturais em consequência da menor resistência por parte da argamassa presente na sua constituição.

Ferreira (2010), por seu turno, obteve com as escórias de aciaria de FAE processadas na SN do Seixal, um valor para o coeficiente de *Los Angeles* igual a 23% (ensaio realizado segundo a especificação LNEC E 237 (1971)) e um valor para o coeficiente micro-Deval igual a 11% (ensaio realizado segundo a EN 1097-1 (1998)), ao passo que com as escórias de aciaria de FAE processadas na SN da Maia, obteve 28% para o coeficiente de *Los Angeles* e 11% para o coeficiente micro-Deval. Como conclusão, referiu-se ao ASIC como um material resistente à fragmentação e ao desgaste.

Já Rohde (2002), conforme mencionado na secção 2.5.1, procedeu à imersão de amostras de escórias de aciaria de FAE processadas numa solução de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, com o objetivo de avaliar a sua durabilidade. Além de não ter observado quaisquer alterações significativas no material ensaiado, obteve perdas de massa do material inferiores a 1%.

A par dos dados bibliográficos apresentados anteriormente, destacam-se ainda os resultados obtidos nos ensaios de DMA realizados com agregados naturais de litologia idêntica à dos utilizados no presente trabalho. Na tabela 3.27 sumarizam-se alguns dos exemplos apresentados na secção 2.5.7, e destes, observa-se que apenas LNEC (1986), Conde *et al.* (2004) e Sharma e Singh (2007) obtiveram valores de  $I_d$  da mesma ordem de grandeza dos calculados para os dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, e para os dois agregados naturais, o basalto e o calcário.

**Tabela 3.27** Síntese de resultados dos ensaios de DMA com agregados naturais

Material	Autor	$I_d$	Valor obtido com água
Calcário	LNEC (1986)	$I_{d2}$	99,3-99,7
		$I_{d6}$	96,7-98,8
	Jeremias (2000) (a)	$I_{d2}$	74,5
		$I_{d5}$	62,4
	Conde <i>et al.</i> (2004)	$I_{d2}$	98,3-99,4
	Kolay e Kayabali (2006) (b)	$I_{d1}$	96,6-98,7 (A) 87,6-97,0 (S) 85,3-98,6 (A*)
		$I_{d2}$	91,4-96,3 (A) 84,2-92,0 (S) 82,2-94,8 (S*)
		$I_{d3}$	86,9-95,6 (A) 81,7-90,9 (S) 79,6-94,3 (S*)
		$I_{d4}$	84,4-93,9 (A) 79,6-87,1 (S) 77,6-91,9 (A*)
Basalto	Sharma e Singh (2007)	$I_{d2}$	97,0-98,9

Legenda: (a) calcário oolítico; (b) calcário argiloso; (A) forma arredondada; (S) forma subangular; (A\*) forma angular

### **3.4.4 - Petrografia dos materiais após ensaio de DMA**

Na presente secção apresentam-se as análises macro e micropetrográfica efetuadas nos dois agregados reciclados,  $AB_{RCD}$  e ASIC, e nos dois agregados naturais, o basalto e o calcário, após a realização dos ensaios de DMA. Pelas razões expostas na secção 3.4.1, as observações efetuadas são comparadas com as realizadas sobre os mesmos materiais mas antes de submetidos aos ensaios de DMA.

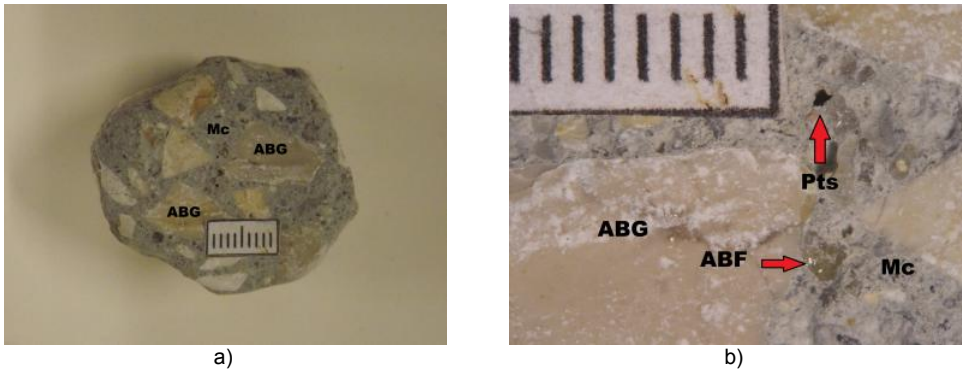
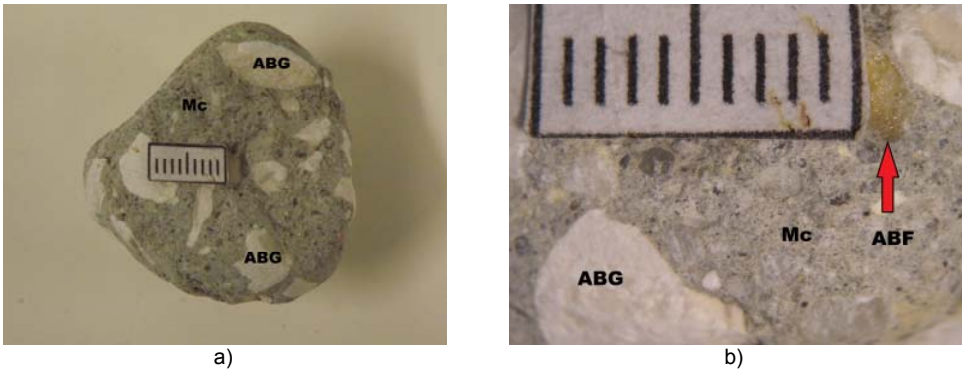
Em cada material, começa-se por apresentar, em tabelas, a análise macroscópica, seguida da análise microscópica. Tanto num caso como noutro, as análises são agrupadas em função do meio aquoso utilizado na realização dos ensaios de DMA. Em cada um destes grupos, faz-se a distinção entre os ensaios de DMA sem e com imersão prévia de 15 dias nos respetivos meios aquosos.

No final das descrições e das ilustrações para cada material, procede-se a uma análise comparativa global do estudo petrográfico.

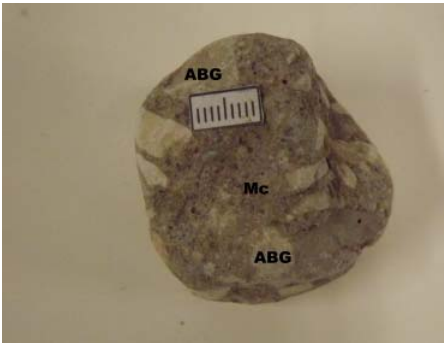
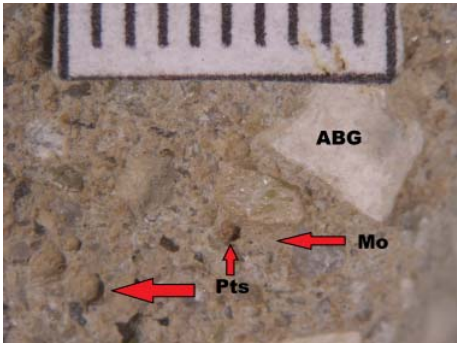
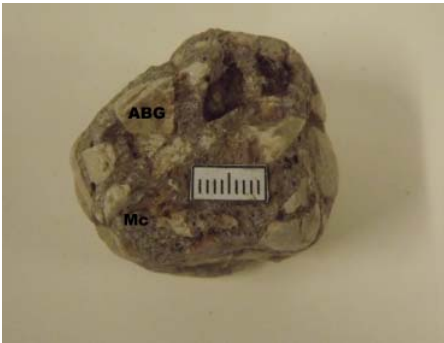
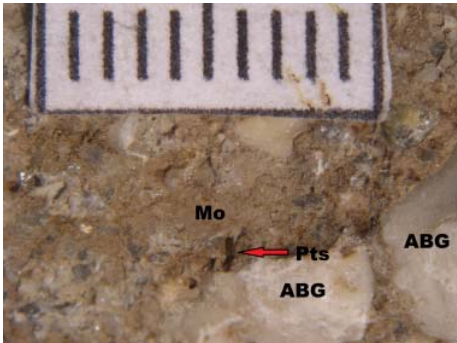
#### **3.4.4.1 - $AB_{RCD}$**

Nas tabelas 3.28 e 3.29 são apresentados os resultados do estudo macropetrográfico do  $AB_{RCD}$ , após o material ter sido submetido aos ensaios de DMA nos meios aquoso, água e lixiviado, respetivamente, enquanto que, as tabelas 3.30 e 3.31 mostram os resultados do estudo micropetrográfico. Como complemento à descrição efetuada, para ambos os casos mostram-se as respetivas macro e microfotografias.

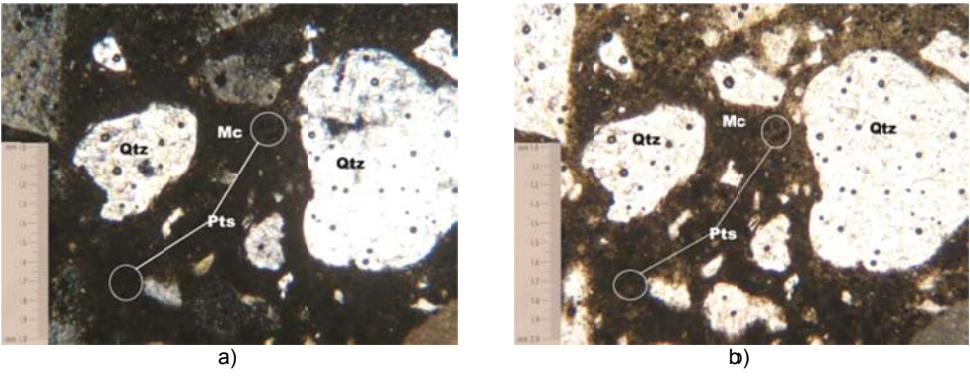
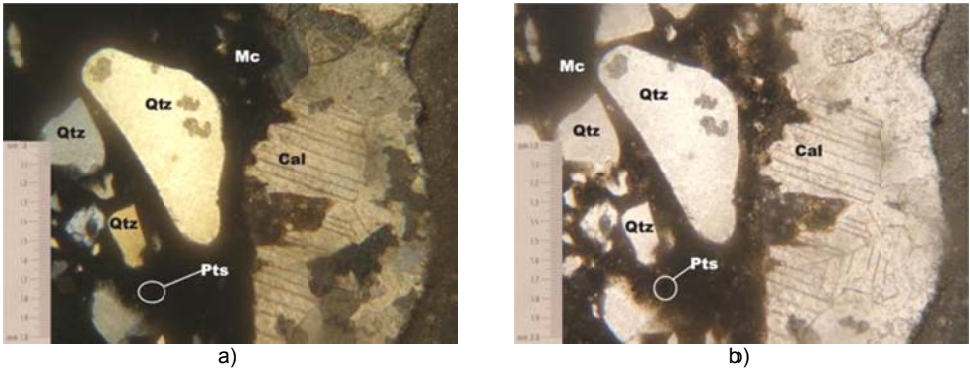
**Tabela 3.28** Análise das alterações macropetrográficas do AB<sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA realizados em água

Meio aquoso: água	
Provete	Sem imersão prévia
AB <sub>RCD_DMA_A</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Agregado Britado Fino - ABF; Agregado Britado Grosso - ABG; Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts</p> <p><b>Figura 3.75</b> Aspeto macroscópico do provete AB<sub>RCD_DMA_A</sub>: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
AB <sub>RCD_DMA_I_A</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Agregado Britado Fino - ABF; Agregado Britado Grosso - ABG; Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts</p> <p><b>Figura 3.76</b> Aspeto macroscópico do provete AB<sub>RCD_DMA_I_A</sub>: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>

**Tabela 3.29** Análise das alterações macropetrográficas do AB<sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA realizados no lixiviado

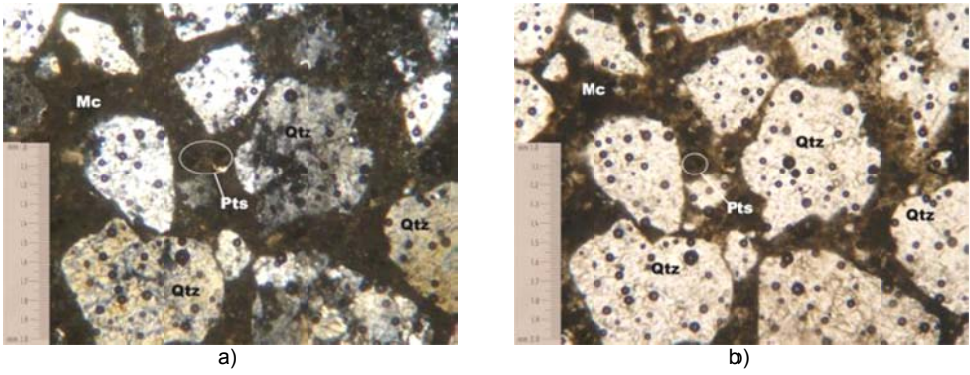
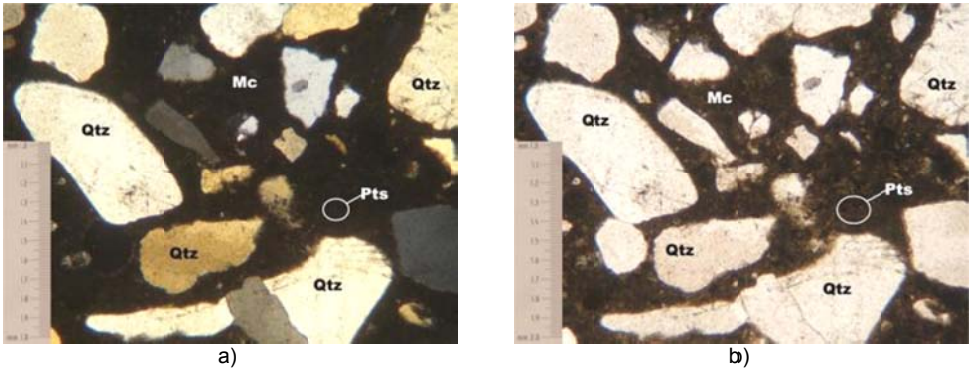
Meio aquoso: lixiviado	
Provete	Sem imersão prévia
AB <sub>RCD_DMA_L</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observam-se alterações na cor da matriz cimentícia, que passa a apresentar uma cor castanha clara, em resultado do contacto do provete com o lixiviado durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> <li>Observa-se, também, a deposição de matéria orgânica na matriz cimentícia.</li> <li>O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> </div> </div> <p>Legenda: Agregado Britado Grosso - ABG; Matéria orgânica - Mo; Poros - Pts</p> <p><b>Figura 3.77</b> Aspeto macroscópico do provete AB<sub>RCD_DMA_L</sub>: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
AB <sub>RCD_DMA_i_L</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observam-se alterações na cor da matriz cimentícia, que passa a apresentar cor castanha clara, em resultado do contacto do provete com o lixiviado durante o período de imersão e de execução do ensaio de DMA.</li> <li>Observa-se, também, a deposição de matéria orgânica na matriz cimentícia.</li> <li>O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> </div> </div> <p>Legenda: Agregado Britado Grosso - ABG; Matéria orgânica - Mo; Poros - Pts</p> <p><b>Figura 3.78</b> Aspeto macroscópico do provete AB<sub>RCD_DMA_i_L</sub>: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>

**Tabela 3.30** Análise das alterações micropetrográficas do AB<sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA realizados em água

Meio aquoso: água	
Provete	Sem imersão prévia
AB <sub>RCD_DMA_A</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts; Quartzo - Qtz</p> <p><b>Figura 3.79</b> Microfotografias da lâmina delgada AB<sub>RCD_DMA_A</sub>: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
AB <sub>RCD_DMA_I_A</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Calcite - Cal; Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts; Quartzo - Qtz</p> <p><b>Figura 3.80</b> Microfotografias da lâmina delgada AB<sub>RCD_DMA_I_A</sub>: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x</p>



**Tabela 3.31** Análise das alterações micropetrográficas do AB<sub>RCD</sub> após o ensaios de DMA realizados no lixiviado

Meio aquoso: lixiviado	
Provete	Sem imersão prévia
AB <sub>RCD_DMA_L</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts; Quartzo - Qtz</p> <p><b>Figura 3.81</b> Microfotografias da lâmina delgada AB<sub>RCD_DMA_L</sub>: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
AB <sub>RCD_DMA_L</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Calcite - Cal; Matriz cimentícia - Mc; Poros - Pts; Quartzo - Qtz</p> <p><b>Figura 3.82</b> Microfotografias da lâmina delgada AB<sub>RCD_DMA_L</sub>: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x</p>

Dos resultados mostrados nas quatro tabelas anteriores são de salientar os pontos seguintes:

a) macroscopicamente observaram-se alterações apenas nos provetes AB<sub>RCD\_DMA\_L</sub> e AB<sub>RCD\_DMA\_L</sub>, materializadas pela deposição de matéria orgânica na superfície dos provetes e consequente alteração da cor da sua matriz cimentícia, de cinzento, cor original, para castanho claro;


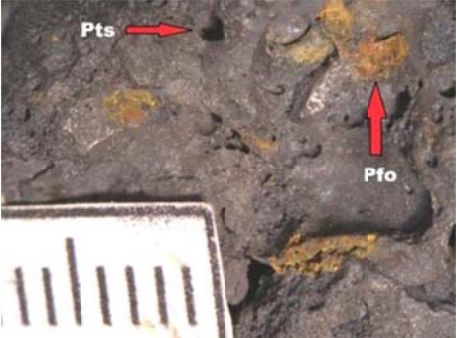
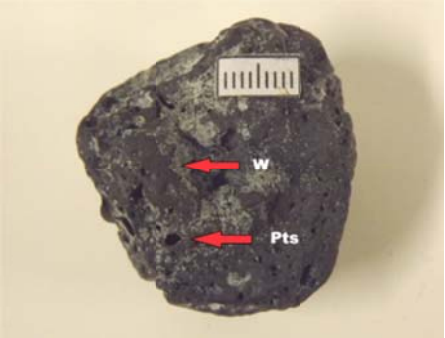
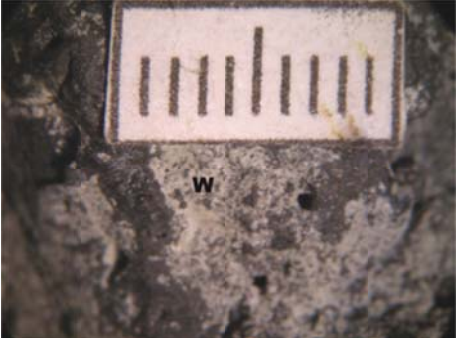

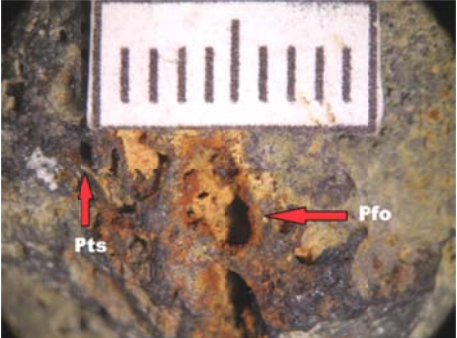
b) microscopicamente, não se observaram alterações, quer na matriz dos provetes, quer nas espécies minerais identificadas, calcite e quartzo, dos agregados naturais presentes nos provetes de AB<sub>RCD</sub>.

#### 3.4.4.2 - ASIC

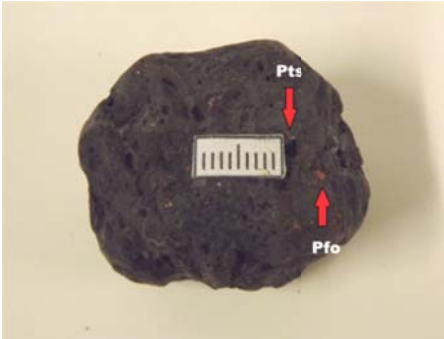
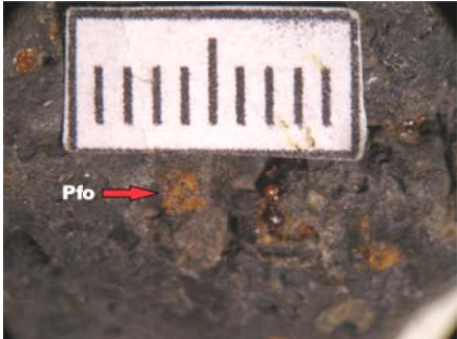
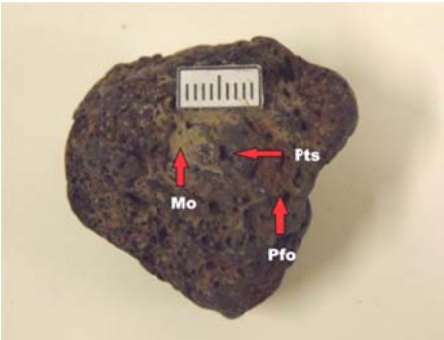
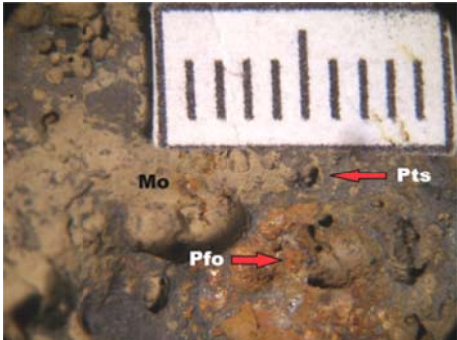
Os resultados do estudo macro e micropetrográfico do ASIC, após este ter sido submetido aos ensaios de DMA, são apresentados respetivamente nas tabelas 3.32 e 3.33, e nas tabelas 3.34 e 3.35. A descrição da análise efetuada é complementada com as respetivas macro e microfotografias.



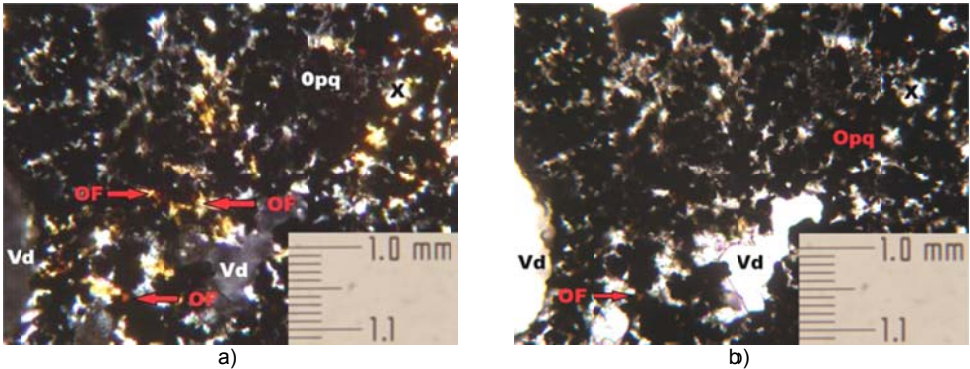
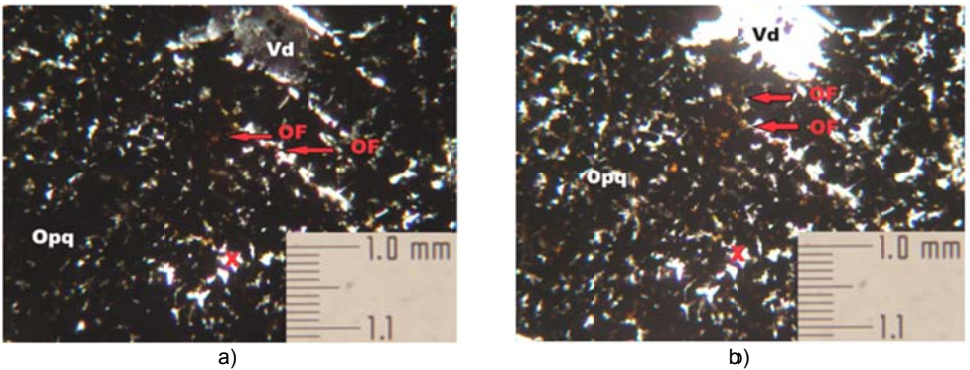
**Tabela 3.32** Análise das alterações macropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados em água

Meio aquoso: água	
Provete	Sem imersão prévia
ASIC_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observam-se diversos pontos de cor castanha a alaranjada, facto que indicia a oxidação de partículas de ferro presentes no ASIC.</li> </ul> <div>   </div> <div> <div>a)</div> <div>b)</div> </div>
	<div> <div>Legenda: Partícula de ferro oxidada - Pfo; Poros - Pts</div> <div>Figura 3.83 Aspeto macroscópico do provete ASIC DMA A: a) visão geral; b) visão pormenorizada</div> </div>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
ASIC_DMA <sub>i</sub> _A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verifica-se a precipitação de um material de cor branca a acinzentada na superfície do provete, em particular nos alvéolos, cuja natureza não se identificou a olho nu (figura 3.84a e 3.84b).</li> <li>Observam-se, também, diversos pontos de cor castanha-escura, rodeada por uma auréola de cor alaranjada e amarelada que indicia a oxidação das partículas de ferro presentes no ASIC (figura 3.84c e 3.84d).</li> </ul> <div>   </div> <div> <div>a)</div> <div>b)</div> </div> <div>   </div> <div> <div>c)</div> <div>d)</div> </div>
	<div> <div>Legenda: Partícula de ferro oxidada - Pfo; Poros - Pts; material de cor branca precipitado no corpo do provete ASIC_DMA<sub>i</sub>_A - W</div> <div>Figura 3.84 Aspeto macroscópico do provete ASIC_DMA<sub>i</sub>_A: a) e c) visão geral; b) e d) visão pormenorizada</div> </div>

**Tabela 3.33** Análise das alterações macropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados no lixiviado

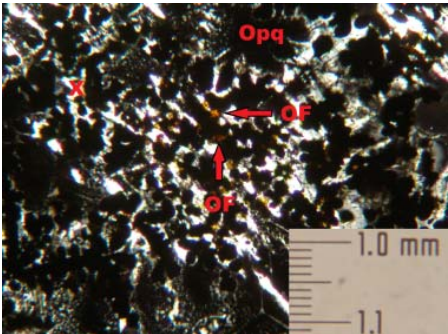
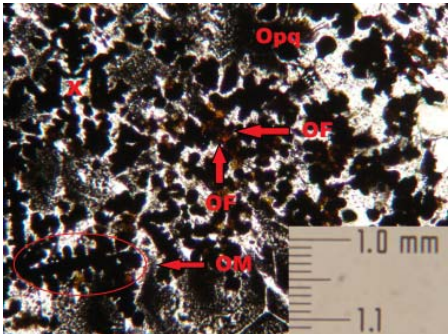
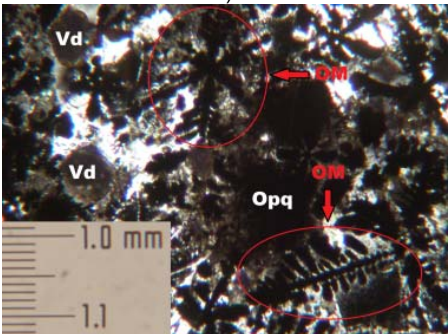
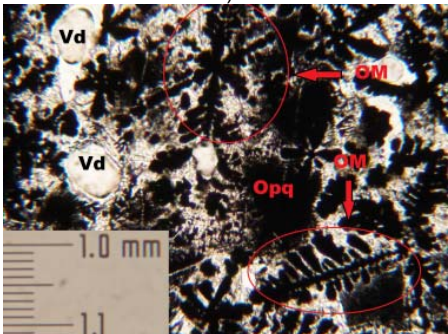
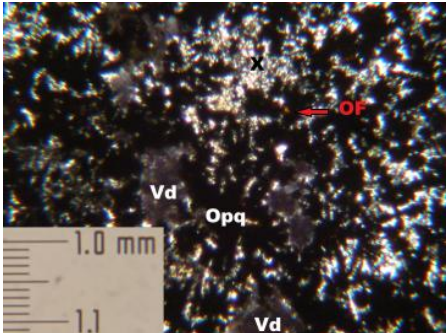
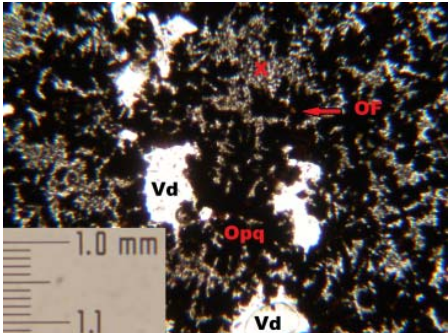
Meio aquoso: lixiviado	
Provete	Sem imersão prévia
ASIC_DMA_L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observam-se diversos pontos de cor castanha a alaranjada, facto que indicia a oxidação de partículas de ferro presentes no ASIC.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p>Legenda: Partícula de ferro oxidada - Pfo; Poros - Pts</p> <p><b>Figura 3.85</b> Aspeto macroscópico do provete ASIC_DMA_L: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
ASIC_DMA_L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observa-se a deposição de matéria orgânica oriunda do lixiviado na superfície do provete, em particular nos alvéolos.</li> <li>Observam-se, também, diversos pontos de cor castanha a alaranjada, facto que indicia a oxidação de partículas de ferro presentes no ASIC.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p>Legenda: Matéria orgânica - Mo; Partícula de ferro oxidada - Pfo; Poros - Pts</p> <p><b>Figura 3.86</b> Aspeto macroscópico do provete AB<sub>RCD</sub>_DMA_L: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>

**Tabela 3.34** Análise das alterações micropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados em água

Meio aquoso: água	
Provete	Sem imersão prévia
ASIC_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observa-se uma maior concentração de minerais opacos e de óxidos de ferro.</li> <li>• A forma acicular identificada na lâmina delgada do provete ASIC não foi observada em ASIC_DMA_A.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Óxidos de Ferro - OF; minerais Opacos - Opq; Vidro da lâmina delgada - Vd; espécie mineral não identificada - X</p> <p><b>Figura 3.87</b> Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA_A: a) NX com ampliação de 200x; b) N// com ampliação de 200x</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
ASIC_DMA_I_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observa-se uma maior concentração de minerais opacos e de óxidos de ferro.</li> <li>• A forma acicular identificada na lâmina delgada do provete ASIC não foi observada em ASIC_DMA_A.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p> <p>Legenda: Óxidos de Ferro - OF; minerais Opacos - Opq; Vidro da lâmina delgada - Vd; espécie mineral não identificada - X</p> <p><b>Figura 3.88</b> Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA_I_A: a) NX com ampliação de 200x; b) N// com ampliação de 200x</p>



**Tabela 3.35** Análise das alterações micropetrográficas do ASIC após os ensaios de DMA realizados no lixiviado

Meio aquoso: lixiviado	
Provete	Sem imersão prévia
ASIC_DMA_L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observa-se uma maior concentração de minerais opacos e de óxidos de ferro (figura 3.89a e 3.89b), e em algumas zonas da lâmina delgada observam-se também minerais com hábito dendrítico, facto que pode indicar a presença de óxidos de manganês no ASIC_DMA_L (figura 3.89c e 3.89d).</li> <li>A forma acicular identificada na lâmina delgada do provete ASIC não foi observada em ASIC_DMA_L.</li> </ul>
	 <p>a)</p>  <p>b)</p>
	 <p>c)</p>  <p>d)</p>
	<p>Legenda: Óxidos de Ferro - OF; Óxidos de Manganês - OM; minerais Opacos - Opq; Vidro da lâmina delgada - Vd; espécie mineral não identificada - X</p> <p><b>Figura 3.89</b> Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA_L: a) e c) NX com ampliação de 200x; b) e d) N// com uma ampliação de 200x</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
ASIC_DMA_L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observa-se uma maior concentração de minerais opacos e de óxidos de ferro;</li> <li>A forma acicular identificada na lâmina delgada do provete ASIC não foi observada em ASIC_DMA_L.</li> </ul>
	 <p>a)</p>  <p>b)</p>
<p>Legenda: Óxidos de Ferro - OF; minerais Opacos - Opq; Vidro da lâmina delgada - Vd; espécie mineral não identificada - X</p> <p><b>Figura 3.90</b> Microfotografias da lâmina delgada ASIC_DMA_L: a) NX com ampliação de 200x; b) N// com ampliação de 200x</p>	


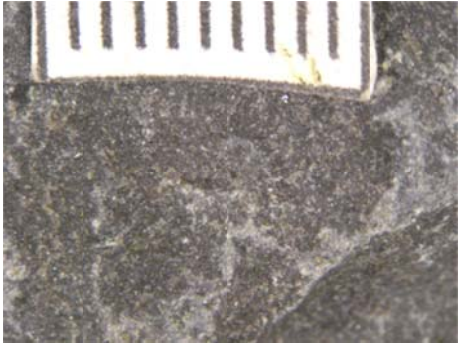

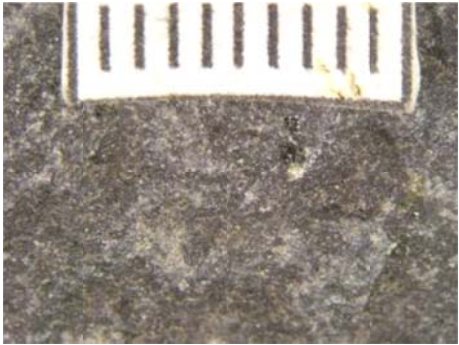
Dos resultados apresentados nas tabelas anteriores, destacam-se, da análise macroscópica: (a) ocorrência de alterações em todos os provetes, nomeadamente a oxidação das partículas de ferro; (b) a precipitação de um material de cor branca, cuja natureza não foi identificada, na superfície do provete ASIC\_DMA<sub>I</sub>\_A, em particular nos alvéolos; e (c) a deposição de matéria orgânica na superfície do provete ASIC\_DMA<sub>L</sub>\_L, em particular nos alvéolos. No que respeita à análise microscópica, observou-se, em todas as lâminas delgadas, uma maior concentração de minerais opacos e de óxidos de ferro. Na lâmina delgada do provete ASIC\_DMA<sub>L</sub>\_L verificou-se que em algumas zonas da lâmina os minerais opacos apresentavam um hábito dendrítico, facto que pode indiciar a presença de óxidos de manganês.

Algumas observações retidas da análise macroscópica são corroboradas pelo já descrito na secção 2.4.2.5.3, nomeadamente no que respeita à possível ocorrência de fenómenos de corrosão e de oxidação das partículas de ferro presentes no corpo das escórias de aciaria de FAE processadas. Outras observações, como a precipitação de um material de cor branca no provete ASIC\_DMA<sub>I</sub>\_A, são igualmente mencionadas na bibliografia consultada, nomeadamente em Graffitti (2002), que identifica o material de cor branca identificado como compostos  $Ca(OH)_2$  e  $CaCO_3$ , formados a partir da cal livre presente na composição da escória.


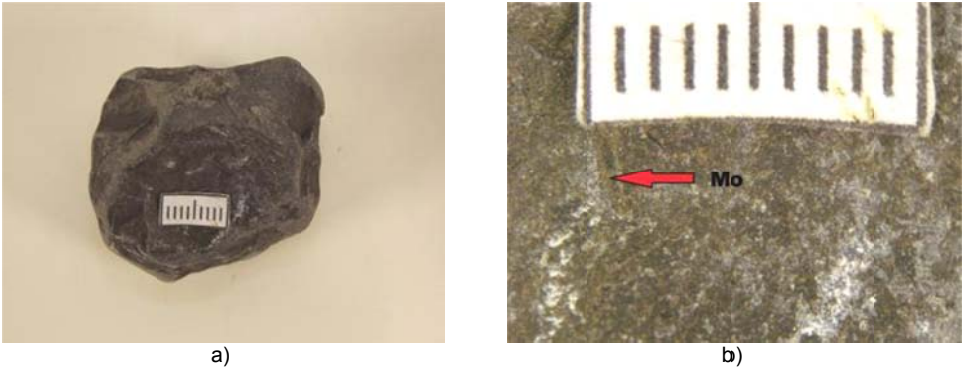
#### **3.4.4.3 - Basalto**

Os resultados do estudo macro e micropetrográfico do basalto, após este ter sido submetido aos ensaios de DMA, são apresentados, respetivamente, nas tabelas 3.36 e 3.37, e nas tabelas 3.38 e 3.39. A descrição da análise efetuada é complementada com as respetivas macro e microfotografias.

**Tabela 3.36** Análise das alterações macropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados em água

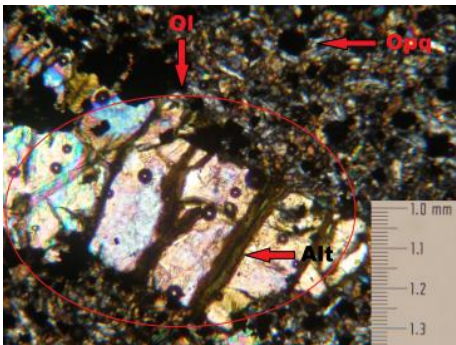
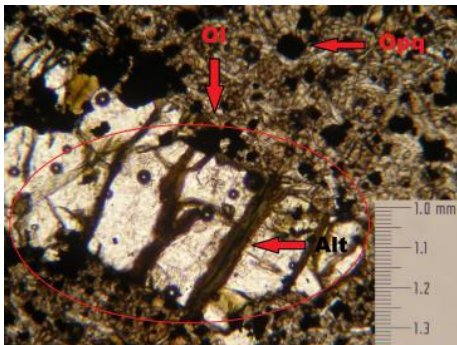
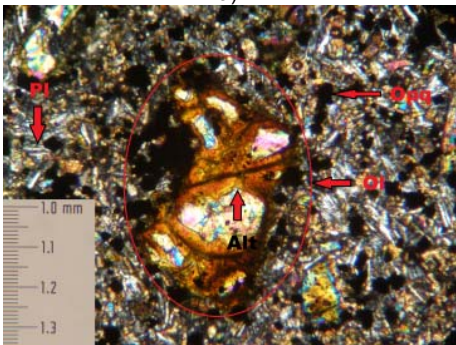
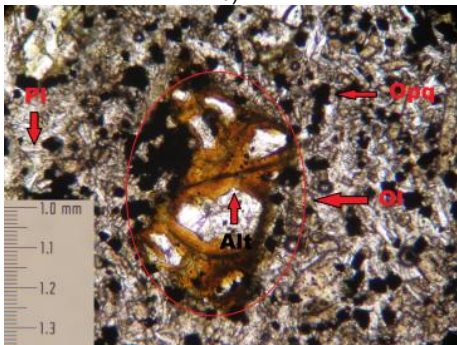
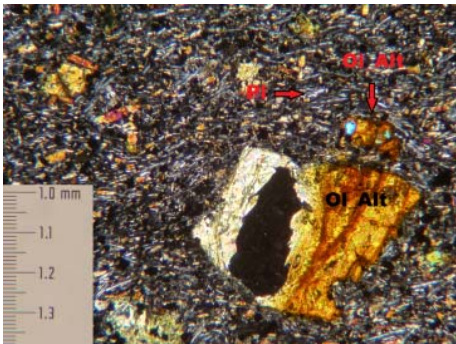
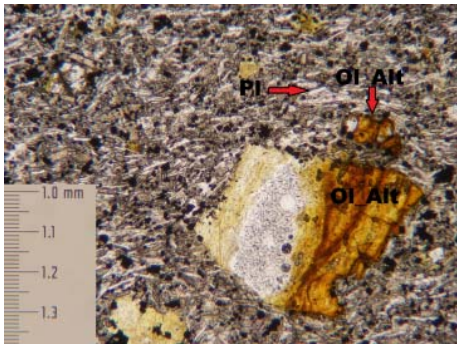
Meio aquoso: água	
Provete	Sem imersão prévia
Bas_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>• O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p><b>Figura 3.91</b> Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA_A: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
Bas_DMA_I_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observam-se diversos pontos de cor alaranjada na superfície do basalto, facto que indicia a oxidação dos minerais de olivina.</li> <li>• O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p><b>Figura 3.92</b> Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA_I_A: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>

**Tabela 3.37** Análise das alterações macropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados no lixiviado

Solução aquosa: lixiviado	
Provete	Sem imersão prévia
<b>Bas_DMA_L</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>• O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p>
<b>Figura 3.93</b> Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA_L: a) visão geral; b) visão pormenorizada	
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
<b>Bas_DMA<sub>I</sub>_L</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observa-se uma ligeira alteração na cor do basalto, nomeadamente nas suas superfícies mais irregulares, onde passa a apresentar uma cor castanha clara em resultado do contacto do provete com o lixiviado durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> <li>• Observa-se, também, a deposição de matéria orgânica oriunda do lixiviado nas superfícies irregulares do provete.</li> <li>• O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	 <p>a) b)</p>
<p>Legenda: Matéria orgânica - Mo</p> <p><b>Figura 3.94</b> Aspeto macroscópico do provete Bas_DMA<sub>I</sub>_L: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>	

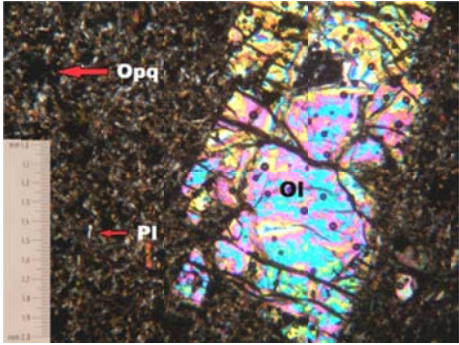
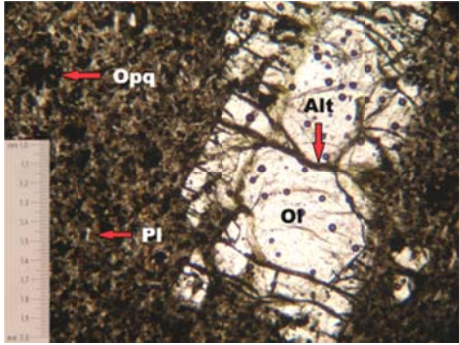
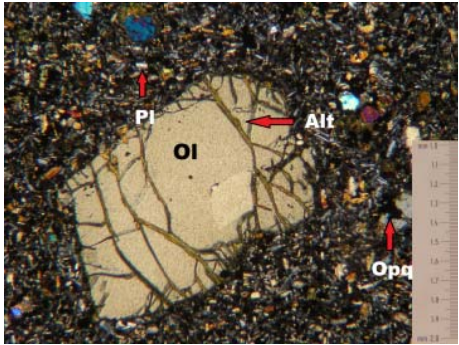
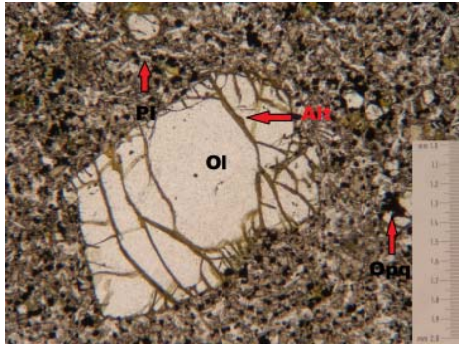
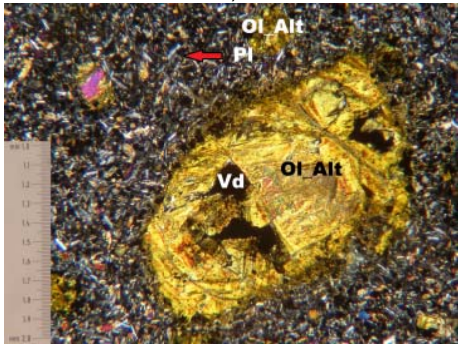
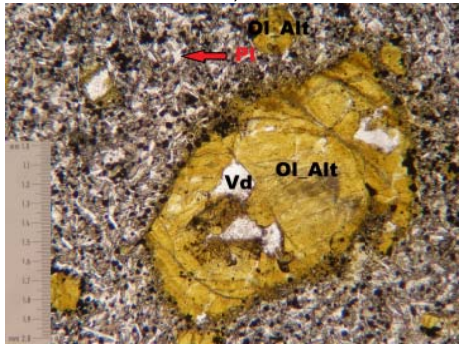


**Tabela 3.38** Análise das alterações micropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados em água

Meio aquoso: água	
Provete	Sem imersão prévia
Bas_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os fenocristais de olivina apresentam-se parcialmente alterados: (1) nas figuras 3.95a e 3.95b observa-se dois tipos de preenchimento das suas fracturas: um de cor castanha no perímetro das fracturas e um outro de cor verde no interior das mesmas; (2) nas figuras 3.95c e 3.95d observa-se uma fase mais avançada de alteração materializada pelo desaparecimento do material de cor verde no interior das fracturas e o alastramento do de cor castanha para o interior do fenocristal.</li> <li>Não são visíveis indícios de alteração nos restantes minerais que compõem a matriz do basalto.</li> </ul>
	 <p>a)</p>
	 <p>b)</p>
	 <p>c)</p>
	 <p>d)</p>
<p>Legenda: sinais de Alteração - Alt; Olivina - Ol; minerais Opacos - Opq; Plagioclase - Pl</p> <p><b>Figura 3.95</b> Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA_A: a) e c) NX com ampliação de 100x; b) e d) N// com uma ampliação de 100x</p>	
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
Bas_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os fenocristais de olivina encontram-se alterados, parcial ou totalmente: nas figuras 3.96a e 3.96b observa-se que o fenocristal de olivina foi substituído na sua totalidade por uma fase secundária de cor castanha a amarela, tendo ainda ocorrido a perda parcial da sua massa.</li> <li>Não são visíveis indícios de alteração nos restantes minerais que compõem a matriz do basalto.</li> </ul>
	 <p>a)</p>
	 <p>b)</p>
<p>Legenda: Olivina Alterada - Ol_Alt; Plagioclase - Pl</p> <p><b>Figura 3.96</b> Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA_A: a) NX com ampliação de 100x; b) N// com ampliação de 100x</p>	



**Tabela 3.39** Análise das alterações micropetrográficas do basalto após os ensaios de DMA realizados no lixiviado

Meio aquoso: lixiviado	
Provete	Sem imersão prévia
Bas_DMA_L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os fenocristais de olivina apresentam indícios de alteração, facto materializado pelo preenchimento das suas fracturas com um material de cor verde.</li> <li>Não são visíveis indícios de alteração nos restantes minerais que compõem a matriz do basalto.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p>Legenda: sinais de Alteração - Alt; Olivina - Ol; minerais Opacos - Opq; Plagioclase - Pl</p> <p><b>Figura 3.97</b> Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA_L: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x</p>
Provete	Com imersão prévia (15dias)
Bas_DMA_L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os fenocristais de olivina apresentam-se alterados, parcial ou totalmente: (1) nas figuras 3.98a e 3.98b observa-se o preenchimento das suas fracturas com um material de cor amarela; (2) nas figuras 3.98c e 3.98d observa-se que o fenocristal de olivina foi substituído na sua totalidade por uma fase secundária de cor castanha a amarela, tendo ainda ocorrido a perda parcial da sua massa.</li> <li>Não são visíveis indícios de alteração nos restantes minerais que compõem a matriz do basalto</li> </ul>
	  <p>a) b)</p>   <p>c) d)</p> <p>Legenda: sinais de Alteração - Alt; Olivina - Ol; Olivina Alterada - Ol_Alt; Plagioclase - Pl; Vidro da lâmina delgada -Vd</p> <p><b>Figura 3.98</b> Microfotografias da lâmina delgada Bas_DMA_L: a) e c) NX com ampliação de 50x; b) e d) N// com ampliação de 50x</p>





Dos resultados constantes nas tabelas apresentadas na presente secção são de destacar os pontos seguintes: a) macroscopicamente verificaram-se alterações no provete Bas\_DMA<sub>I</sub>\_A, com as olivinas a aparecerem oxidadas, e no provete Bas\_DMA<sub>I</sub>\_L, com a deposição de matéria orgânica nas superfícies irregulares dos provetes em resultado do seu contacto com o lixiviado; b) microscopicamente observaram-se alterações em todas as lâminas delgadas analisadas, com as olivinas a apresentarem indícios de alteração em Bas\_DMA\_L, parcialmente alteradas em Bas\_DMA\_A e parcial ou totalmente alteradas, com perda parcial da sua massa, em Bas\_DMA<sub>I</sub>\_A e Bas\_DMA<sub>I</sub>\_L.

O fenómeno de alteração dos cristais de olivina é abordado por alguns autores, nomeadamente Brilha (1997) e Fritz e Mohr (1984, *in* Simão, 2003). Brilha (*op. cit.*) detalha as características petrográficas observadas em cristais de olivina no estado são e alterado, referindo que, neste último, os cristais são geralmente substituídos na sua totalidade “(...) por fases secundárias de tons esverdeados, acinzentados e acastanhados”. Já Fritz e Mohr (1984, *in* Simão, *op. cit.*), reportando-se aos cristais de olivina alterados, referem que o fenómeno de “(...) alteração ocorre até grandes distâncias a partir de fendas e fracturas na olivina”. O exposto corrobora assim o observado nas lâminas delgadas utilizadas no estudo microscópico realizado após a execução dos ensaios de DMA.




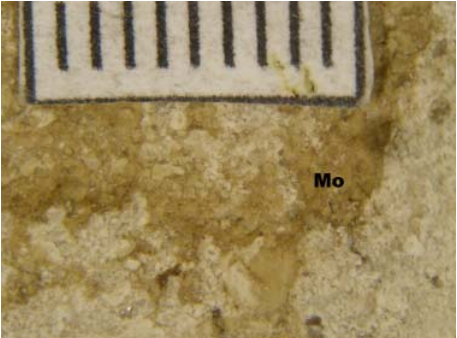
#### **3.4.4.4 - Calcário**

Nas tabelas 3.40 e 3.41, e nas tabelas 3.42 e 3.43 são apresentados, respetivamente, os resultados do estudo macro e micropetrográfico do calcário, após este ter sido submetido aos ensaios de DMA. A descrição da análise efetuada é complementada com as respetivas macro e microfotografias.

**Tabela 3.40** Análise das alterações macropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados em água

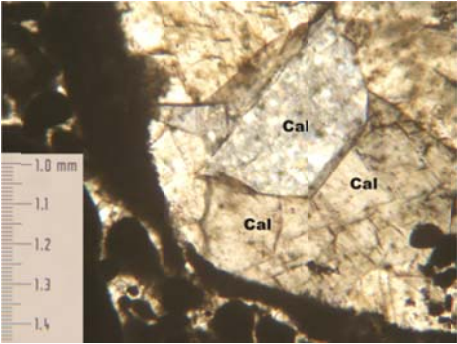
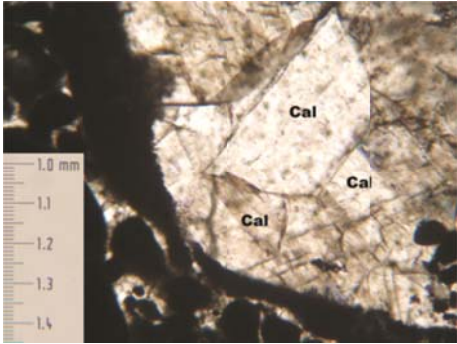
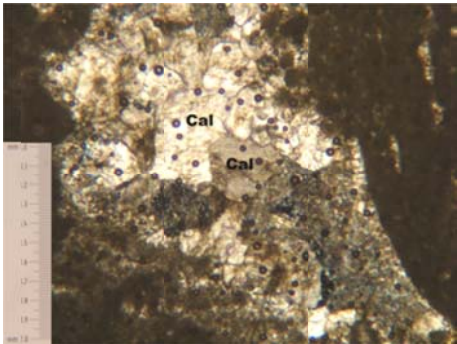
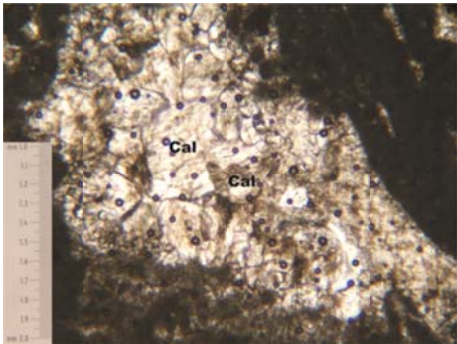
Meio aquoso: água	
Provede	Sem imersão prévia
Cal_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>• O aspeto polido do provede deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p>
<b>Figura 3.99</b> Aspeto macrosscópico do provede Cal_DMA_A: a) visão geral; b) visão pormenorizada	
Provede	Com imersão prévia (15 dias)
Cal_DMA <sub>i</sub> _A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>• O aspeto polido do provede deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p>
<b>Figura 3.100</b> Aspeto macrosscópico do provede Cal_DMA <sub>i</sub> _A: a) visão geral; b) visão pormenorizada	

**Tabela 3.41** Análise das alterações macropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados no lixiviado

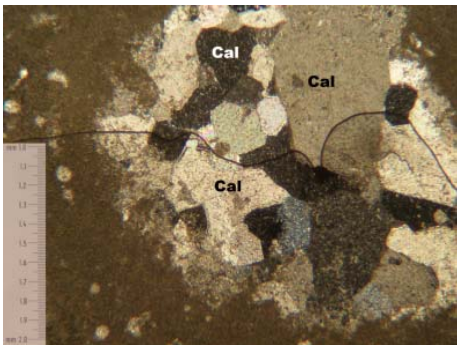
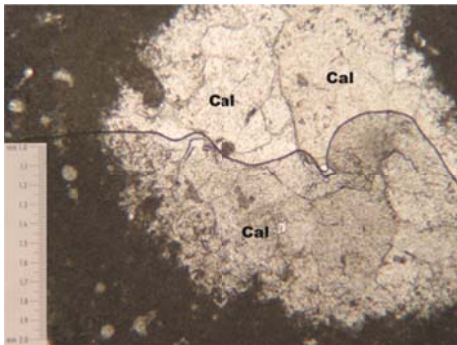
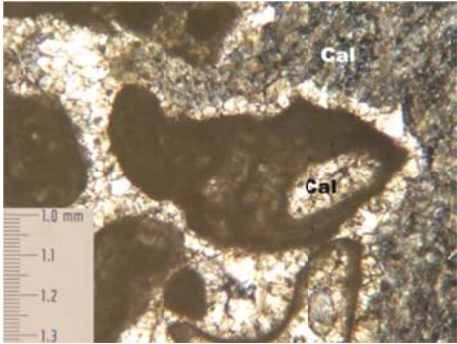
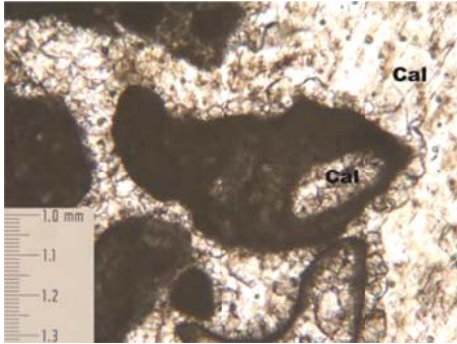
<b>Meio aquoso: lixiviado</b>	
<b>Provete</b>	<b>Sem imersão prévia</b>
<b>Cal_DMA_L</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observa-se uma ligeira alteração na cor do calcário, nomeadamente nas suas superfícies mais irregulares, onde passa a apresentar uma cor castanha clara em resultado do contacto do provete com o lixiviado no decorrer do ensaio de DMA.</li> <li>• O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que este foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span>a)</span> <span>b)</span> </div> <p><b>Figura 3.101</b> Aspeto macroscópico do provete Cal_DMA_L: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>
<b>Provete</b>	<b>Com imersão prévia (15 dias)</b>
<b>Cal_DMA_L</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observa-se uma alteração na cor do basalto, nomeadamente nas suas superfícies mais irregulares, onde passa a apresentar uma cor castanha clara em resultado do contacto do provete com o lixiviado durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> <li>• Observa-se, também, a deposição de matéria orgânica oriunda do lixiviado nas superfícies irregulares do provete.</li> <li>• O aspeto polido do provete deve-se às ações mecânicas a que foi submetido durante o período de execução do ensaio de DMA.</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span>a)</span> <span>b)</span> </div> <p>Legenda: Matéria orgânica - Mo</p> <p><b>Figura 3.102</b> Aspeto macroscópico do provete Cal_DMA_L: a) visão geral; b) visão pormenorizada</p>



**Tabela 3.42** Análise das alterações micropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados em água

Meio aquoso: água	
Provete	Sem imersão prévia
Cal_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>• A pouca nitidez (algo "baça") da lâmina, dever-se-á, ao processo da sua execução, provavelmente, a um polimento insuficiente.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p>Legenda: Calcite - Cal</p> <p><b>Figura 3.103</b> Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA_A: a) NX com ampliação de 100x; b) N// com ampliação de 100x</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
Cal_DMA_A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>• A pouca nitidez (algo "baça") da lâmina, dever-se-á, ao processo da sua execução, provavelmente, a um polimento insuficiente.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p>Legenda: Calcite - Cal</p> <p><b>Figura 3.104</b> Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA_A: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x</p>

**Tabela 3.43** Análise das alterações micropetrográficas do calcário após os ensaios de DMA realizados no lixiviado

Meio aquoso: lixiviado	
Provete	Sem imersão prévia
Cal_DMA_L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p>Legenda: Calcite - Cal</p> <p><b>Figura 3.105</b> Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA_L: a) NX com ampliação de 50x; b) N// com ampliação de 50x</p>
Provete	Com imersão prévia (15 dias)
Cal_DMA <sub>I</sub> _L	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não são visíveis indícios de alteração.</li> <li>A pouca nitidez (algo "baça") da lâmina, dever-se-á, ao processo da sua execução, provavelmente, a um polimento insuficiente.</li> </ul>
	  <p>a) b)</p> <p>Legenda: Calcite - Cal</p> <p><b>Figura 3.106</b> Microfotografias da lâmina delgada Cal_DMA<sub>I</sub>_L: a) NX com ampliação de 100x; b) N// com ampliação de 100x</p>

Os resultados apresentados nas quatro tabelas anteriores podem ser resumidos nos pontos seguintes: a) macroscopicamente, observaram-se alterações apenas nos provetes submetidos aos ensaios de DMA realizados no lixiviado, materializadas pela alteração da cor nos provetes Cal\_DMA\_L e Cal\_DMA<sub>I</sub>\_L, e pela deposição de matéria orgânica nas irregularidades do provete Cal\_DMA<sub>I</sub>\_L; b) microscopicamente não se observaram alterações.

#### 3.4.4.5 - Análise comparativa da petrografia dos materiais após ensaio de DMA

Na presente secção procede-se à análise comparativa dos resultados obtidos no estudo petrográfico efetuado nos provetes e nas lâminas delgadas dos provetes de AB<sub>RCD</sub>, de ASIC, de basalto e de calcário submetidos aos ensaios de DMA, tendo por referência as suas características petrográficas iniciais, descritas na secção 3.4.1.

De acordo com a análise macropetrográfica apresentada, não se verificaram alterações significativas nos quatro materiais estudados. Ainda assim, é de destacar a observação de fenómenos de oxidação de partículas de ferro em todos os provetes de ASIC, e dos minerais de olivina no provete Bas\_DMA<sub>I</sub>\_A. É de salientar, ainda, a deposição de matéria orgânica na superfície dos provetes dos quatro materiais ensaiados com o lixiviado, em particular na matriz cimentícia dos provetes de AB<sub>RCD</sub> e nos alvéolos dos provetes de ASIC.

Da análise micropetrográfica verificou-se terem ocorrido alterações em todos os provetes de ASIC, correspondentes a um aumento da concentração dos minerais opacos e dos óxidos de ferro, e a diferentes graus de alteração dos minerais de olivina observados nos provetes de basalto. Em particular nos provetes Bas\_DMA<sub>I</sub>\_A e Bas\_DMA<sub>I</sub>\_L, os minerais de olivina apresentaram-se parcial ou totalmente alterados, nalguns casos mesmo com perda de massa.

As alterações observadas na análise petrográfica não foram, contudo, suficientemente importantes ao ponto de se refletirem na durabilidade dos materiais estudados.

### **3.4.5 - Características físicas dos materiais após ensaio de DMA**

Na presente secção são apresentados os resultados obtidos para as propriedades estudadas nos ensaios de caracterização física realizados com os provetes utilizados nos ensaios de DMA. Tendo em vista a avaliação de modificações na  $M_{VR}$ , na  $M_{VA}$ , na  $P_e$  e no  $w_{max}$  para os quatro materiais, procede-se à sua comparação com as propriedades físicas iniciais dos materiais, ou seja, antes de se realizarem os ensaios de DMA.

Em cada uma das quatro secções que se seguem, analisam-se os resultados obtidos para cada um dos quatro materiais estudados.

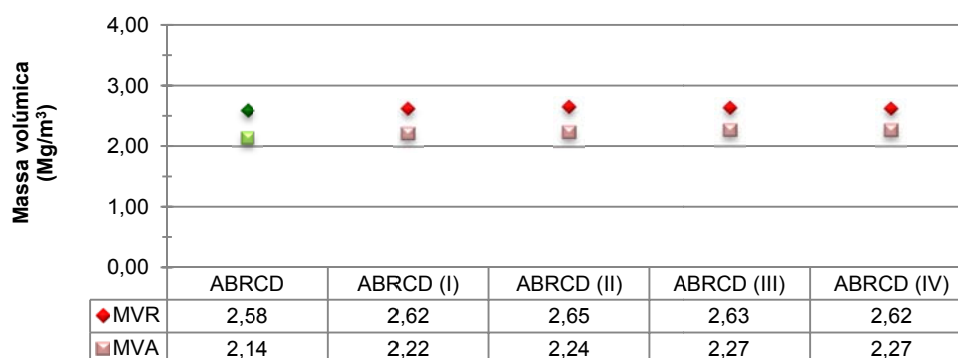
Na última secção procede-se à análise comparativa das propriedades físicas estudadas.

#### **3.4.5.1 - AB<sub>RCD</sub>**

Nas figuras 3.107, 3.108 e 3.109 são apresentados os resultados obtidos no estudo da caracterização física dos provetes de AB<sub>RCD</sub> submetidos aos ensaios de DMA, constando, também, em cada uma delas, as propriedades físicas iniciais do AB<sub>RCD</sub>.

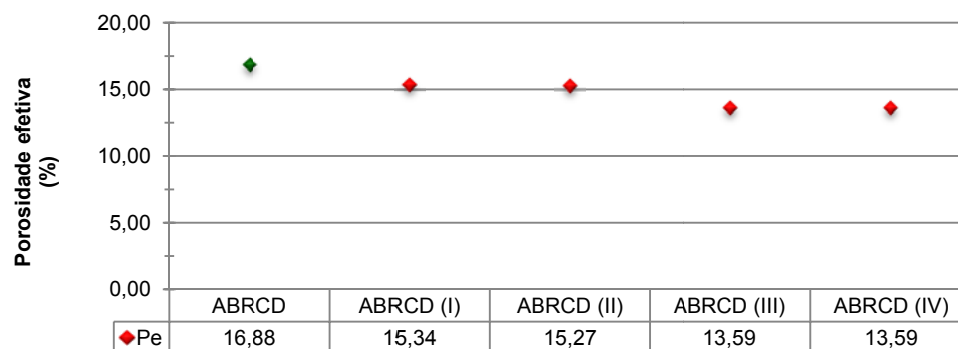
Os gráficos apresentados mostram que apenas na  $P_e$  e no  $w_{max}$  se verifica um ligeiro decréscimo nos seus valores médios após a realização dos ensaios de DMA, sendo este mais significativo no caso dos provetes ensaiados no lixiviado, designadamente AB<sub>RCD</sub>\_DMA\_L e AB<sub>RCD</sub>\_DMA<sub>I</sub>\_L. O observado deve-se, provavelmente, à deposição de matéria orgânica do lixiviado na superfície dos referidos provetes, fenómeno responsável, conforme descrição na análise macropetrográfica apresentada na secção 3.4.4.1, pelo preenchimento de alguns poros da matriz cimentícia dos provetes de AB<sub>RCD</sub> que inicialmente se encontravam acessíveis à água, contribuindo, deste modo, para a ligeira diminuição na sua  $P_e$  e na sua capacidade de absorção de água.

Com efeito, entende-se que o decréscimo verificado nos valores médios da  $P_e$  e do  $w_{max}$  não está diretamente relacionado com as ações químicas e mecânicas experimentadas pelos provetes AB<sub>RCD</sub>\_DMA\_L e AB<sub>RCD</sub>\_DMA<sub>I</sub>\_L durante os ensaios de DMA.



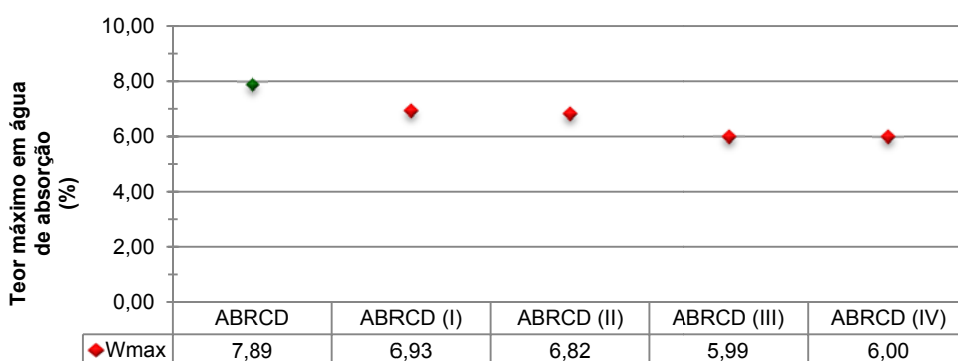
Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.107** Valores médios da  $M_{VR}$  e da  $M_{VA}$  do AB<sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA e comparação com os seus valores médios antes do ensaio de DMA (símbolos a verde)



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.108** Valores médios da  $P_e$  do AB<sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.109** Valores médios do  $w_{max}$  do AB<sub>RCD</sub> após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)

A par do concluído, refira-se, ainda, que a imersão dos provetes de AB<sub>RCD</sub> em água e no lixiviado durante 15 dias, previamente à realização dos ensaios de DMA, não se refletiu nas suas

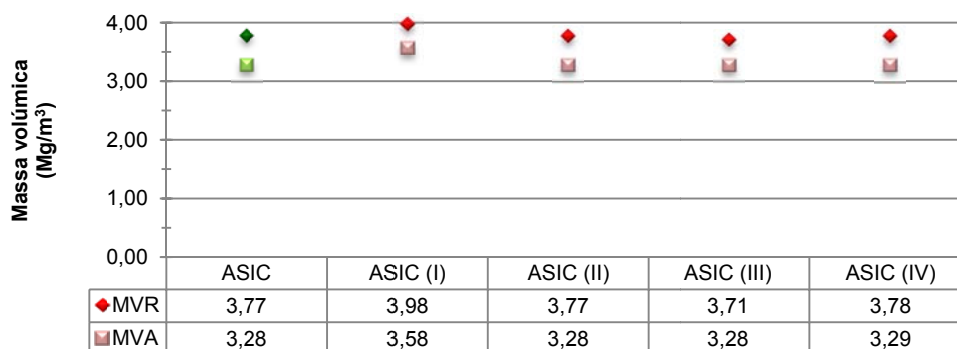


propriedades físicas, que são da mesma ordem de grandeza entre os provetes AB<sub>RCD\_DMA\_A</sub> e AB<sub>RCD\_DMA<sub>I</sub>\_A</sub> e entre os provetes AB<sub>RCD\_DMA\_L</sub> e AB<sub>RCD\_DMA<sub>I</sub>\_L</sub>.

### 3.4.5.2 - ASIC

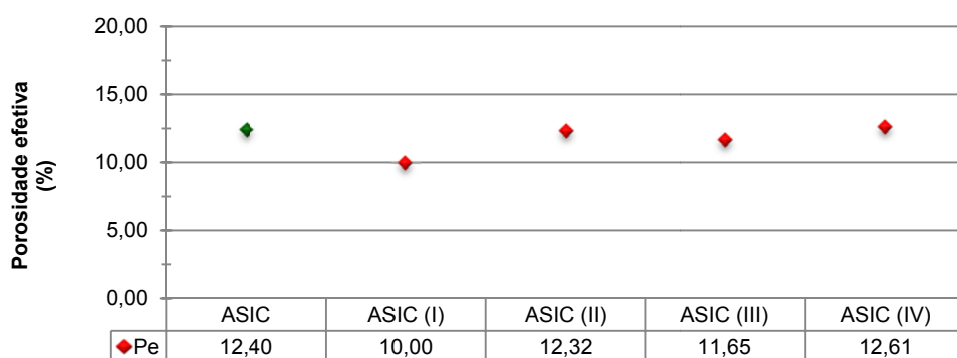
Nas figuras 3.110, 3.111 e 3.112 apresentam-se os resultados do estudo de caracterização física do ASIC obtidos antes e após os ensaios de DMA.

Os valores médios representados para a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$ , a  $P_e$  e o  $w_{max}$  evidenciam que apenas os referentes ao provete ASIC\_DMA\_A não são da mesma ordem de grandeza dos obtidos para os demais provetes: os valores da  $M_{VR}$  e da  $M_{VA}$  são ligeiramente superiores aos restantes; e os valores para as outras duas propriedades físicas são ligeiramente inferiores. Este facto pode não estar, contudo, diretamente relacionado com as ações resultantes da realização dos ensaios de DMA, dado que tanto os resultados do estudo da durabilidade como da análise petrográfica não sustentam as diferenças observadas nos resultados obtidos nos ensaios de caracterização física.



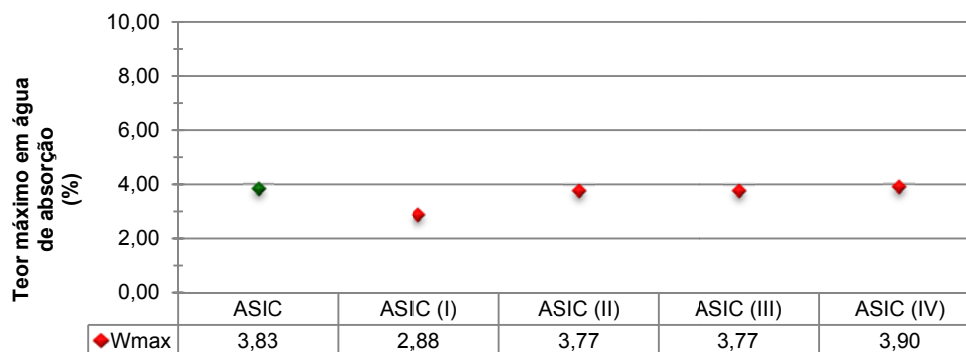
Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.110** Valores médios da  $M_{VR}$  e da  $M_{VA}$  do ASIC após os ensaios de DMA e comparação com os seus valores médios antes dos ensaios de DMA (símbolos a verde)



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.111** Valores médios da  $P_e$  do ASIC após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.112** Valores médios do  $w_{max}$  do ASIC após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)

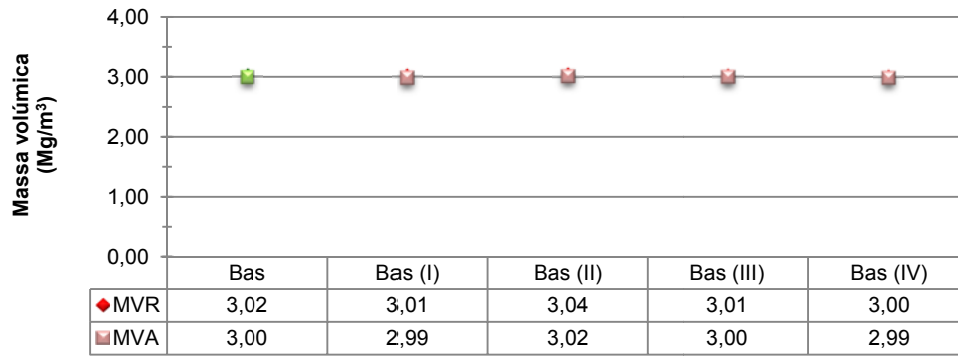
De igual modo ao observado na secção 3.4.2.2 com os resultados dos ensaios de caracterização física com os provetes de amostras frescas de ASIC, os resultados obtidos com os provetes ASIC\_DMA\_A devem estar preferencialmente relacionados com a heterogeneidade textural do ASIC, em particular com a quantidade e a dimensão dos alvéolos na superfície dos provetes. No caso dos 6 provetes ASIC\_DMA\_A utilizados no ensaio para a determinação das propriedades físicas, verificou-se que a  $P_e$  e o  $w_{max}$  variaram, respetivamente, entre 2,58% e 17,56%, e entre 0,60% e 5,49%, o que indica que no mesmo ensaio de caracterização física foram utilizados provetes pouco porosos (percentagem de alvéolos pouco importante) e muito porosos (percentagem de alvéolos importante). A heterogeneidade textural é comum aos restantes provetes ensaiados, porém, o intervalo de valores obtidos é menor ou a maior parte dos 6 provetes ensaiados apresentam valores idênticos.

A confirmar-se a análise exposta no parágrafo anterior, conclui-se que não ocorreram alterações nas propriedades físicas do ASIC após os ensaios de DMA realizados no presente trabalho, ou que essas alterações foram pouco significativas. Conclui-se também que a utilização de dois meios aquosos com características substancialmente diferentes, e a imersão dos provetes durante 15 dias antes da realização dos ensaios de DMA não influenciou ou influenciou de forma pouco significativa as propriedades físicas iniciais do ASIC.

### 3.4.5.3 - Basalto

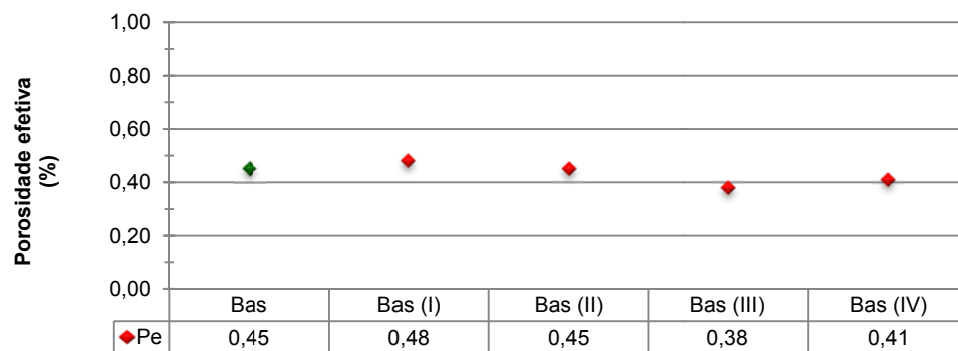
Os resultados do estudo da caracterização física do basalto realizado antes e após os ensaios de DMA encontram-se representados nas figuras 3.113, 3.114 e 3.115.

Os valores médios representados para a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$ , a  $P_e$  e o  $w_{max}$  dos provetes Bas, Bas\_DMA\_A, Bas\_DMA<sub>I</sub>\_A, Bas\_DMA\_L e Bas\_DMA<sub>I</sub>\_L, são da mesma ordem de grandeza, permitindo concluir que, independentemente das condições de realização dos ensaios de DMA, as propriedades físicas iniciais do basalto amostrado não se alteraram ou a alteração, a verificar-se, foi muito pouco significativa.



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.113** Valores médios da  $M_{VR}$  e da  $M_{VA}$  do basalto após os ensaios de DMA e comparação com os seus valores médios antes do ensaio de DMA (símbolos a verde)



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.114** Valores médios da  $P_e$  do basalto após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)

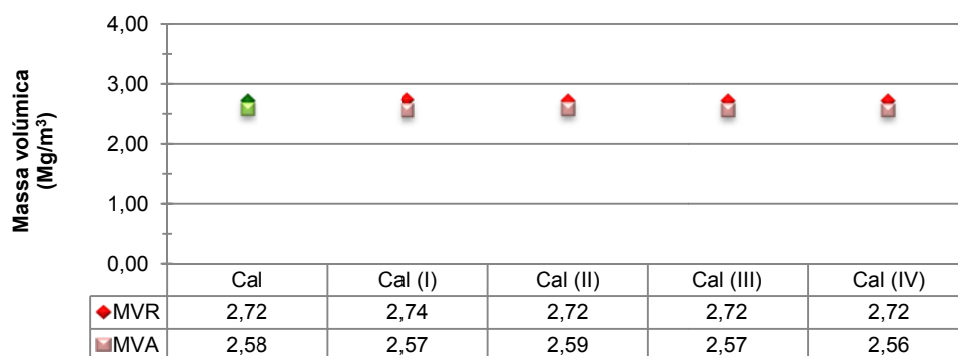


Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.115** Valores médios do  $w_{max}$  do basalto após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)

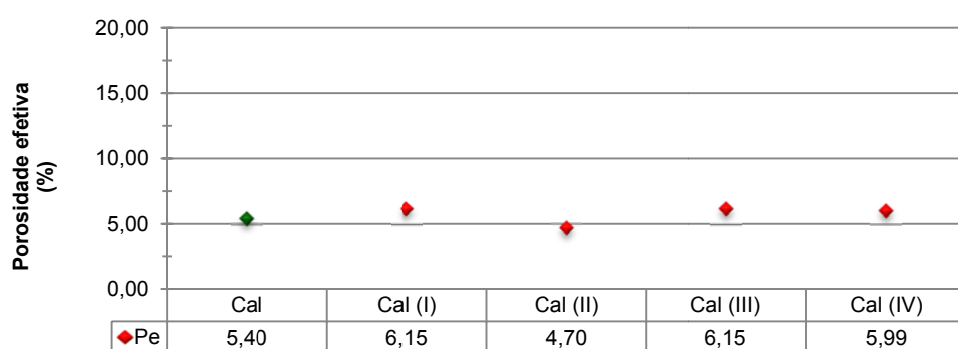
#### 3.4.5.4 - Calcário

Nas figuras 3.116, 3.117 e 3.118 resumem-se os resultados do estudo da caracterização física do calcário realizado antes e após os ensaios de DMA.



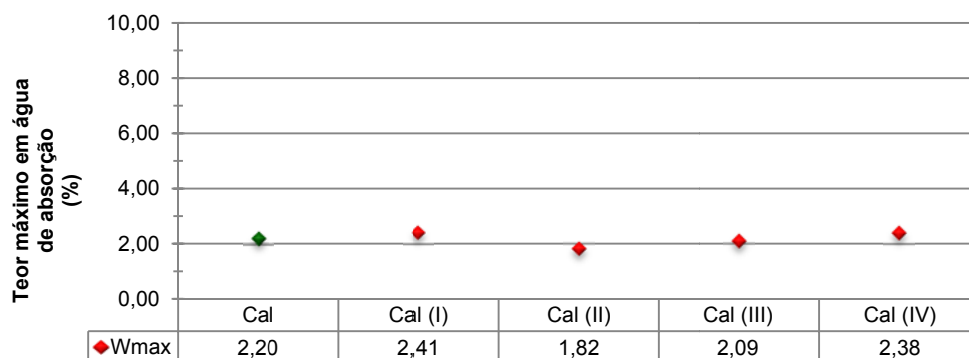
Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.116** Valores médios da  $M_{VR}$  e da  $M_{VA}$  do calcário após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.117** Valores médios da  $P_e$  do calcário após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)



Legenda: (I) \_DMA\_A; (II) \_DMA<sub>I</sub>\_A; (III) \_DMA\_L; (IV) \_DMA<sub>I</sub>\_L

**Figura 3.118** Valores médios do  $w_{max}$  do calcário após os ensaios de DMA e comparação com o seu valor médio antes do ensaio de DMA (símbolo a verde)

Conforme observado em relação ao basalto, também no caso do calcário se verifica que os valores médios da  $M_{VR}$ , da  $M_{VA}$ , da  $P_e$  e do  $w_{max}$  dos provetes submetidos aos ensaios de DMA são de ordem de grandeza semelhante às respetivas propriedades físicas iniciais do referido material. Conclui-se, por isso, que as ações químicas e mecânicas a que os provetes estiveram submetidos nos ensaios de DMA não alteraram, ou alteraram de forma muito pouco significativa, as propriedades físicas iniciais do calcário amostrado.

#### **3.4.5.5 - Análise comparativa das características físicas dos materiais após ensaio de DMA**

Nesta secção apresentam-se as principais conclusões do estudo da caracterização física do AB<sub>RCD</sub>, do ASIC, do basalto e do calcário, tendo por base os resultados obtidos com os provetes daqueles materiais submetidos aos ensaios de DMA e a comparação destes resultados com as suas propriedades físicas iniciais.

De um modo geral, a comparação dos resultados obtidos para a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$ , a  $P_e$  e o  $w_{max}$  do AB<sub>RCD</sub>, do ASIC, do basalto e do calcário, antes e após a realização dos ensaios de DMA, mostra que a utilização de diferentes meios aquosos, a água e o lixiviado, e o prolongamento das ações mecânicas (ciclo de desgaste adicional de 600 rotações) e do período de contacto entre o meio aquoso e o material (imersão dos provetes durante 15 dias antes da realização dos ensaios de DMA), não se traduziu em alterações quantitativamente importantes nas propriedades físicas do quatro materiais estudados.

As principais alterações a assinalar estão associadas à  $P_e$  e ao  $w_{max}$  e ocorreram nos provetes de AB<sub>RCD</sub> ensaiados no lixiviado, ou seja, AB<sub>RCD</sub>\_DMA\_L e AB<sub>RCD</sub>\_DMA<sub>i</sub>\_L. Entre estes e o provete AB<sub>RCD</sub>, a diferença percentual foi de cerca de 3,3% no caso da  $P_e$  e de 2,0% no caso do  $w_{max}$ , devendo-se tais diferenças ao facto de em algumas zonas da superfície da matriz cimentícia dos provetes daquele agregado, que estiveram em contacto com o lixiviado nos ensaios de DMA, se ter verificado o preenchimento dos poros aí existentes com matéria orgânica.

Conforme referido nas secções relativas à análise macropetrográfica dos provetes após realização dos ensaios de DMA no lixiviado, o fenómeno de deposição de matéria orgânica ocorreu em todos os provetes dos quatro materiais estudados, mas sobretudo nos que foram imersos antes de submetidos aos ensaios de DMA. Observa-se, porém, que a expressão quantitativa da sua deposição apenas se verifica nos provetes de AB<sub>RCD</sub>. Em relação aos dois agregados naturais, a diferença de comportamento explica-se pela maior porosidade superficial no AB<sub>RCD</sub> que no basalto e no calcário. No que se refere ao ASIC, essa explicação deverá estar preferencialmente relacionada com a heterogeneidade textural da superfície dos seus provetes, responsável por variações muito significativas nas propriedades físicas estudadas de provete para provete, que diminuem o efeito da deposição da matéria orgânica nos valores médios obtidos para a  $P_e$  e o  $w_{max}$ .

### **3.5 - Conclusões finais**

Nesta secção foi apresentado o estudo da durabilidade de dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, tendo por referência a durabilidade de dois agregados naturais, o basalto e o calcário, igualmente avaliada nesta dissertação. Em complemento, procedeu-se às análises macro e micropetrográfica, e à caracterização física dos quatro materiais antes e após a realização dos ensaios para o estudo da sua durabilidade.

Tendo por base os resultados obtidos, apresentam-se em seguida as principais conclusões:

- i. A caracterização petrográfica inicial não identificou sinais de alteração nos quatro materiais estudados.
- ii. Os resultados da caracterização física inicial mostraram que o ASIC é o material mais denso, em grande parte devido à presença de partículas de ferro, o AB<sub>RCD</sub> o menos denso, mais poroso e com  $w_{max}$  mais elevado, em virtude da sua matriz cimentícia, e o basalto o menos poroso e com  $w_{max}$  mais baixo.
- iii. Os resultados dos ensaios de DMA mostraram que o  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  nos quatro materiais são superiores a 95,0%, pertencendo os materiais em estudo, de acordo com a classificação de Gamble (1971), à categoria de materiais de durabilidade muito elevada.
- iv. Ainda que a diferença percentual máxima entre os  $I_d$  dos quatro materiais seja apenas de 2,9%, é possível definir a seguinte ordem crescente de durabilidade: AB<sub>RCD</sub> < ASIC  $\cong$  calcário < basalto.
- v. Nem o prolongamento das ações mecânicas (mais um ciclo de desgaste que o previsto pelo método seguido, que corresponde a mais 600 rotações) e a sujeição dos materiais a condições químicas mais agressivas (contacto com o lixiviado de pH 5,50) e mais prolongadas (imersão prévia dos provetes durante 15 dias), nem a maior  $P_e$  e  $w_{max}$  dos dois agregados reciclados comparativamente aos dos dois agregados naturais tiveram influência relevante na durabilidade dos materiais.
- vi. Apesar dos resultados obtidos para o calcário nos ensaios de DMA, será necessário efetuar estudos complementares ao presentemente realizado, que permitam avaliar a possibilidade de se desenvolverem fenómenos de dissolução deste material se aplicado em estruturas de drenagem de obras geotécnicas, e, em particular, na camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos.
- vii. O controlo dos meios aquosos de ensaio, a água e o lixiviado, com os parâmetros químicos pH, Eh e C.E., evidenciou que, de um modo geral, foi maior a variação destes parâmetros nos ensaios de DMA com os agregados reciclados que com os agregados naturais.
- viii. Nos ensaios de DMA com água, os agregados reciclados aumentaram a alcalinidade da água, enquanto que os agregados naturais não alteraram substancialmente as características neutras iniciais daquele meio aquoso. No contacto com o lixiviado ácido, os agregados reciclados e o calcário alteraram as características do meio aquoso para neutras, ao passo que o basalto apenas contribuiu para diminuir o carácter ácido do meio. Em relação ao Eh, verificou-se que os agregados reciclados contribuíram mais que os agregados naturais para o aumento do poder redutor dos dois meios aquosos. As medições de C.E. evidenciaram a migração de sais solúveis à água nos quatro materiais, traduzida pelo aumento da C.E. inicial da água ao longo da fase de imersão e do ensaio de DMA. Os valores da C.E. muito elevados do lixiviado utilizado e a sua evaporação na fase de imersão prejudicaram, neste caso, a formulação de quaisquer conclusões.

- ix. A análise macroscópica realizada após o termo do estudo da resistência ao desgaste dos materiais em meio aquoso mostrou que não existiram alterações significativas comparativamente com as características macropetrográficas iniciais. As principais alterações assinaladas foram sinais de oxidação das partículas de ferro nos provetes de ASIC, em particular nos imersos em água, e dos minerais de olivina no provete Bas\_DMA<sub>i</sub>\_A, e a cor castanha clara na superfície dos provetes ensaiados com o lixiviado. Esta particularidade tornou-se mais evidente nos casos em que os provetes foram previamente imersos no lixiviado. Esta película de material orgânico, que nos provetes de AB<sub>RCD</sub> e de ASIC se acumulou nos poros superficiais dos provetes, deverá ter contribuído para mascarar a oxidação de algumas das partículas de ferro nos provetes do ASIC.
- x. Da análise micropetrográfica verificou-se terem ocorrido alterações em todos os provetes de ASIC, correspondentes a um aumento da concentração dos minerais opacos e dos óxidos de ferro, e a diferentes graus de alteração dos minerais de olivina nos provetes do basalto. Em particular nos provetes Bas\_DMA<sub>i</sub>\_A e Bas\_DMA<sub>i</sub>\_L, os minerais de olivina apresentavam-se parcial ou totalmente alterados, nalguns casos mesmo com perda de massa. Conclui-se, contudo, que para as condições de ensaio de DMA adotadas no estudo, as alterações observadas na análise micropetrográfica não foram suficientemente importantes para se refletirem na durabilidade dos quatro materiais estudados.
- xi. A comparação dos resultados obtidos para a  $M_{VR}$ , a  $M_{VA}$ , a  $P_e$  e o  $w_{max}$  do AB<sub>RCD</sub>, do ASIC, do basalto e do calcário, antes e após a realização dos ensaios de DMA, mostra que as diferentes ações mecânicas e químicas a que os materiais foram submetidos durante o ensaio de DMA, e o contacto prévio entre os materiais e o meio aquoso, não produziram alterações quantitativamente significativas nestas propriedades.





## 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo desenvolvido no âmbito desta dissertação teve como principal objetivo avaliar a durabilidade de dois agregados reciclados, o  $AB_{RCD}$  e o ASIC, resultantes do processamento de dois resíduos, respetivamente, de RCD de betão e de escórias de aciaria de FAE, tendo em vista a sua utilização na construção de estruturas de drenagem de infraestruturas de transporte e de obras geotécnicas, em particular na camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema dos proteção basal ativo de aterros de resíduos.

No capítulo 1 foi apresentada uma breve justificação para a temática abordada na presente dissertação, assim como os objetivos que se pretendiam alcançar com o estudo realizado e a metodologia seguida para o cumprimento dos mesmos.

No capítulo 2 foram tratados diversos assuntos relacionados com o trabalho desenvolvido, designadamente: quadro legal e regulamentação técnica sobre agregados reciclados, com enfoque nos RCD e nas escórias de aciaria de FAE; caracterização dos aterros de resíduos e particularidades sobre a camada de drenagem e recolha de lixiviados; caracterização dos RCD e das escórias de aciaria de FAE; e durabilidade dos materiais.

Nas secções referentes ao quadro legal e à regulamentação técnica sobre agregados reciclados foi citado o DL nº 73/2011, documento legislativo em vigor em Portugal para as operações de gestão de resíduos, e documentos legais específicos que a nível nacional e internacional estão relacionados com a gestão do fluxo dos RCD e das escórias de aciaria de FAE. Abordou-se também a DPC, que visa os produtos da construção, nos quais se incluem os agregados reciclados, destinados a serem incorporados de modo permanente em obras de engenharia civil e aos quais diz respeito uma ou mais exigências essenciais.

Na secção em que se procedeu à caracterização dos aterros de resíduos, foi tratado o DL nº 183/2009, que estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais a observar nas diferentes fases da obra. Abordou-se, ainda, os elementos estruturais dos aterros de resíduos, em particular a camada de drenagem e recolha dos lixiviados, por se tratar do elemento estrutural da obra em que se pretende aplicar os agregados reciclados estudados.

Nas secções sobre a caracterização dos RCD e das escórias de aciaria de FAE abordou-se algumas temáticas relevantes para o seu enquadramento com o tema da presente dissertação, tais como: a origem; a classificação; a produção a nível nacional e internacional; a caracterização ambiental, química, mineralógica, geométrica, física e mecânica; e, por último, a valorização dos respetivos resíduos, quer na aplicação objeto desta dissertação, quer em outras aplicações da área da engenharia civil.

Na secção referente à durabilidade dos materiais apresentou-se os mecanismos de alteração física e química, alguns deles simulados no ensaio de DMA realizado neste estudo, os efeitos destes mecanismos na durabilidade dos materiais e os métodos utilizados na avaliação da durabilidade dos materiais. A particularização do ensaio de DMA, abordando-se o mecanismo do ensaio e as suas condicionantes, deveu-se ao facto de ter sido o método selecionado para a avaliação da durabilidade

dos quatro materiais selecionados. Apresentou-se ainda alguns estudos recolhidos na bibliografia consultada referentes à durabilidade dos agregados naturais selecionados no âmbito do presente trabalho, o basalto e o calcário. O mesmo não foi possível para os agregados reciclados já mencionados, dado só recentemente terem começado a ser valorizados como materiais de construção e os estudos já realizados não terem contemplado o estudo da sua durabilidade.

No capítulo 3 apresentou-se o trabalho experimental desenvolvido nesta dissertação, que englobou a realização de ensaios de DMA, sem e com imersão prévia dos provetes dos quatro materiais nos dois meios aquosos selecionados, a água da rede de abastecimento público e o lixiviado de um aterro de RSU. Paralelamente a estes ensaios procedeu-se, antes e após a sua realização, à análise macro e micropetrográfica e à caracterização física dos quatro materiais, com o objetivo de avaliar a ocorrência de alterações e respetiva expressão, nos materiais utilizados nos ensaios de DMA. Os resultados obtidos mostraram, para as condições de realização dos ensaios, a adequabilidade dos dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, e dos dois agregados naturais, o basalto e o calcário, para a construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de proteção basal ativo dos aterros de resíduos, bem como para a construção de estruturas de drenagem de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas, numa perspetiva de durabilidade.

O facto de na bibliografia consultada não ser abordado o estudo da durabilidade dos agregados reciclados em geral, e do AB<sub>RCD</sub> e do ASIC em particular, de se perspetivar a sua crescente utilização em obras de engenharia civil a nível nacional e internacional, designadamente na construção e ampliação de aterros de resíduos, e do comportamento dos materiais rochosos aplicados nas obras de engenharia civil já ter evidenciado sobre a relevância da avaliação da sua durabilidade, são indicadores da importância do trabalho realizado e dos resultados aqui apresentados.

Na sequência do exposto e no contexto do estudo desenvolvido na presente dissertação propõem-se as seguintes linhas de investigação para estudos futuros:

- i. Avaliação do comportamento hidráulico dos dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, realizando ensaios de permeabilidade com as granulometrias dos materiais equivalentes à areia e à brita correntemente utilizadas em Portugal na camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos. Os ensaios devem ser realizados com água, à temperatura de 20 °C (*k* de referência) e com lixiviado, às temperaturas de 40 °C e de 20 °C (temperaturas que ocorrem, respetivamente, nas fases inicial e final da exploração dos aterros de RSU). Os ensaios devem prolongar-se por um período de tempo equivalente, ou mesmo superior, ao exigido ao adequado funcionamento das obras. Os ensaios de permeabilidade realizados com água, à temperatura de 20 °C, darão indicações sobre o desempenho dos dois agregados reciclados tendo em vista a sua utilização em estruturas de drenagem de obras geotécnicas em que o meio aquoso seja a água. No caso do ASIC, será particularmente importante verificar se há formação de tufa durante os ensaios.

- ii. Avaliação da durabilidade dos dois agregados reciclados em ensaios de DMA realizados com o lixiviado à temperatura ambiente de 40 °C, sem e com imersão prévia dos provetes (na fase de imersão prévia dos provetes a temperatura do lixiviado é igualmente de 40 °C).
- iii. Prolongamento do período de desgaste no ensaio de DMA, aumentando o número de rotações para 2000, e do período de contacto, aumentando o tempo de imersão para um mês.
- iv. Complementar as técnicas petrográficas e físicas utilizadas nesta dissertação, com a análise química, a análise mineralógica por DRX e a observação ao microscópio eletrónico de varrimento. A caracterização deve ser efetuada pelo menos nos materiais virgens e nos provetes submetidos às condições do ensaio de DMA mais agressivas (lixiviado a 40 °C) e mais prolongadas (imersão dos provetes).

As linhas de investigação propostas para os dois agregados reciclados devem ser igualmente realizadas com os dois agregados naturais estudados nesta dissertação, o basalto e o calcário, cujo desempenho serviria de referência ao desempenho dos agregados reciclados. No caso particular do material calcário, a investigação deverá ter igualmente em consideração a ocorrência de fenómenos de dissolução, na perspetiva de se avaliar a viabilidade técnica da sua utilização na camada de drenagem e recolha dos lixiviado dos aterros de resíduos, a qual não é presentemente autorizada pelo DL nº 183/2009.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Eishah, S. I., El-Dieb, A. S. e Bedir, M. S. (2012). Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 249-256. Science Direct Database.
- Affonso, F. J. A. (2005). *Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 149 p. Disponível em: <[http://www.poc.ufrj.br/teses/mestrado/inter/2005/Teses/AFFONSO\\_FJA\\_05\\_t\\_M\\_int.pdf](http://www.poc.ufrj.br/teses/mestrado/inter/2005/Teses/AFFONSO_FJA_05_t_M_int.pdf)> [consultado em maio de 2011].
- Agustawijaya, D. S. (2003). Modelled mechanisms in the slake-durability test for soft rocks. *Civil Engineering Dimension*, vol. 5 (2), pp. 87-92. Disponível em: <<http://isid.pdii.lipi.go.id/admin/jurnal/52038792.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- Algarvio, D. A. N. (2009). *Reciclagem de resíduos de construção e demolição: Contribuição para controlo do processo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica. 92 p. Disponível em: <<http://run.unl.pt/handle/10362/2023>> [consultado em março de 2011].
- Almeida, J. P. (2011). Produção de RCD'S. *Curso FUNDEC-LNEC - Utilização de agregados reciclados em infraestruturas de transportes*, 2ª ed, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- ALT-MAT. (2001). *Alternative materials in road construction*. Project Founded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4<sup>th</sup> Framework Programme.
- Alves, F. A. P. (2007). *Betões com agregados reciclados: Levantamento do "State-of-the-Art" – Experimental nacional*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 122 p. Disponível em: <<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/151109/1/Dissertacao.pdf>> [consultado em fevereiro de 2012].
- Angulo, S. C. (2005). *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 167 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18112005-155825/pt-br.php>> [consultado em maio de 2011].
- Angulo, S. C., Miranda, L. F. R. e John, V. M. (2002). Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. *Proceedings of the International Conference - Sustainable Building 2002*, Oslo, Norway, 22-24 September, pp. 2307-2316. Disponível em: <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/SB\\_2002\\_angulo%20et%20al.pdf](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/SB_2002_angulo%20et%20al.pdf)> [consultado em maio de 2011].
- Angulo, S. C., Ulsen, C., John, V. M., Kahn, H. e Cincotto, M. A. (2009). Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Management*, vol. 29 (2), pp. 721-730. Science Direct Database.
- APA. (2009). Resíduos de Construção e Demolição. Agência Portuguesa do Ambiente. Disponível em: <<http://www.apambiente.pt/politicasambiente/Residuos/fluxresiduos/RCD/Documents/RCD.pdf>> [consultado em dezembro 2011].

- Araujo, R. M. (2008). *Ativação química e térmica de escória de aciaria elétrica*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação do Campus de Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, Brasil. 93 p. Disponível em: <<http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/ARAUJO,%20Ricardo%20Melo.pdf>> [consultado em maio 2011].
- ASTM C856 (2011). *Standard practice for petrographic examination of hardened concrete*. American Society for Testing and Materials, PA, United States of America.
- ASTM D4687 (1995). *Standard guide for general planning of waste sampling*. American Society for Testing and Materials, PA, United States of America.
- Baptista, D., Claro, E., Lopes, M. L., Fortunato, E. e Monteiro, B. P. B. (2009). Enquadramento normativo da valorização de resíduos em geotecnia. *Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas*, Aveiro, 28-29 de setembro.
- Barandas, R. V. (2009). *Gestão de resíduos de construção e demolição em Trás-os-Montes e Alto Douro*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 122 p. Disponível em: <<http://repositorio.utad.pt/handle/10348/447>> [consultado em março de 2011].
- Barbudo, A., Galvín, A. P., Agrela, F., Ayuso, J. e Jiménez, J. R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Management*, vol. 32 (6), pp. 1229-1235. Science Direct Database.
- Barca, C., Gérente, C., Meyer, D., Chazarenc, F. e Andrès, Y. (2012). Phosphate removal from synthetic and real wastewater using steel slags produced in Europe. *Water Research*, vol. 46 (7), pp. 2376-2384. Science Direct Database.
- Begonha, A. e Sequeira Braga, M. A. (2002). Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. *Catena*, nº 49, pp. 57-76. Science Direct Database.
- Bell, F. G. e Haskins, D. R. (1997). A geotechnical overview of Katse Dam and Transfer Tunnel, Lesotho, with a note on basalt durability. *Engineering Geology*, vol. 46 (2), pp. 175-198. Science Direct Database.
- Bianchini, G., Marrocchino, E., Tassinari, R. e Vaccaro, C. (2005). Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. *Waste Management*, vol. 25 (2), pp. 149-159. Science Direct Database.
- BIO intelligence service. (2011). *Service contract on management of construction and demolition waste - SR1: Final report task 2*. European Commission (DG ENV), Paris, France. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011\\_CDW\\_Report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf)> [consultado em abril de 2012].
- Branco, V. T. F. C., Da Mota, L. M. G. e Soares, J. B. (2004). O efeito da heterogeneidade do agregado de escória de aciaria nas propriedades de misturas asfálticas. *18º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Florianópolis, Brasil, 8-12 de novembro. Disponível em: <[http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/anpet\\_xviiiCongrpesqens/ac/arq11.pdf](http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/anpet_xviiiCongrpesqens/ac/arq11.pdf)> [consultado em abril de 2011].
- Brandl, H. (1998). Risk analyses, quality assurance, and regulations in landfill engineering and environmental protection. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisboa, 8-12 September, vol. 4, pp. 1299-1328.
- BT/PCC/436. (2006). *Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição*. Departamento de Engenharia de Construção civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

- Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50000. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa. Folha nº 30-D.
- Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50000. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa. Folha nº 34-B.
- CEN/TR 15310 (2006). *Characterization of waste: Sampling of waste materials - Part 1-5*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- Ceryan, S. (2008). New chemical weathering indices for estimating the mechanical properties of rocks: A case study from the Kürtün Granodiorite, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 17, pp. 187-207. Disponível em: <<http://journals.tubitak.gov.tr/earth/issues/yer-08-17-1/yer-17-1-8-0604-2.pdf>> [consultado em setembro de 2011].
- Ceryan, S., Tudes, S. e Ceryan, N. (2008). A new quantitative weathering classification for igneous rocks. *Environmental Geology*, vol. 55 (6), pp. 1319-1336. Springerlink Database.
- Chaves, R. dos S. (2009). *Avaliação da implementação do plano de prevenção e gestão de resíduos de construção e demolição*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica. 63 p. Disponível em: <<http://run.unl.pt/handle/10362/3376>> [consultado em março de 2011].
- Chunlin, L., Kunpeng, Z. e Depeng, C. (2011). Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study. *Procedia Engineering*, vol. 24, pp. 412-416. Science Direct Database.
- Claro, E., Sobrinho, S. e Ramos, N. (2009). Plano de prevenção e gestão de resíduos de construção e demolição: Do projeto à obra. *Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas*, Aveiro, 28-29 de setembro.
- Colmanetti, J. P. (2000). *Comportamento de filtros geotêxteis em sistemas de drenagem para resíduos sólidos municipais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. 126 p. Disponível em <<http://www.geotecnia.unb.br/dissertacao/GDM07600.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- Conde, M. C., Dinis da Gama, C. e Lopes, M. G. (2004). Correlação entre o comportamento mecânico de agregados e das rochas originais. 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro, 20-23 de abril. Disponível em: <<http://cegeo.ist.utl.pt/html/investiga/cc1.pdf>> [consultado em junho de 2011].
- Costa, C. N., Águas, C., Curto, P. e Presumido, M. (2005). Reciclagem de resíduos da construção e demolição: Alguns exemplos portugueses. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, 22-26 de maio. Disponível em: <<http://geomuseu.ist.utl.pt/OG2009/Documentos%20Complementares/Congresso%20Geotecnia%20%28resumos%29/Congresso%20Actas%20%28D%29/Volume%203/V3-05.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- Crosta, G. (1998). Slake durability vs ultrasonic treatment for rock durability determinations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 35 (6), pp. 815-824. Science Direct Database.
- Da Silva, F. B. (2009). *Tratamento combinado de lixiviados de aterros sanitários*. Dissertação de Mestrado, Escola Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 117 p. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufri.br/download/tratamento-de-lixiviados-de-aterros-sanitarios.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- Daniel, D. E. (1998). Landfills for solid and liquid wastes. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisboa, 8-12 September, vol. 4, pp. 1231-1246.

- De Juan, M. S. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclados para a fabricación de hormigón estructural*. Tese de Doutoramento, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos da Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha. 502 p. Disponível em: <<http://oa.upm.es/381>> [consultado em setembro de 2011].
- De Lima, L. A. (1999). *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Tese de Doutoramento, Departament d'enginyeria de la construcció da Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports da Univeritat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha. 243 p. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/tesis%20luciana.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- De Matos, A. R. V. (2008). *Contribuição para o estudo da influencia da recirculação de lixiviados no comportamento de aterros de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica. 131 p. Disponível em <<http://run.unl.pt/handle/10362/1859>> [consultado em junho de 2011].
- De Melo, A. B., Gonçalves, A. F. e Martins, I. M. (2011). Construction and demolition waste generation and management in Lisbon (Portugal). *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55 (12), pp. 1252-1264. Science Direct Database.
- Decreto nº 104 (2006). Establece el régimen jurídico aplicable a la gestión de escorias, al objeto de fomentar su valorización, asegurando, asimismo, una adecuada protección del medio ambiente y la salud de las personas y, en particular, sin crear riesgos para el agua, el aire o el suelo, ni para la fauna o flora, sin provocar incomodidades por el ruido o los olores y sin atentar contra los paisajes y lugares de especial interés. Disponível em: <[http://www.camaraantabria.com/medio\\_ambiente/descargas/D\\_104\\_2006.pdf](http://www.camaraantabria.com/medio_ambiente/descargas/D_104_2006.pdf)> [consultado em outubro de 2011].
- Decreto nº 32 (2009). Establece los requisitos medioambientales, el procedimiento administrativo para la valorización de las escorias siderúrgicas, y las obligaciones de las personas productoras, tratadoras y usuarias de estas escorias, garantizando la protección de la salud de las personas y del medio ambiente. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/enterprise/tris/pisa/cfcontent.cfm?vFile=220060223ES.PDF>> [consultado em outubro de 2011].
- Decreto nº 34 (2003). Establece el régimen jurídico aplicable a la valorización y posterior utilización en la Comunidad Autónoma del País Vasco de las escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, con el fin de proteger la salud pública y el medio ambiente. Disponível em: <<http://www.euskadi.net/bopv2/datos/2003/02/0301186a.pdf>> [consultado em outubro de 2011].
- Decreto-Lei nº 178 (2006). Estabelece o regime geral da gestão de resíduos. D.R I Série. 171 (06-09-05). 6526-6545.
- Decreto-Lei nº 183 (2009). Estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros. D.R. I Série. 153 (09-08-10). 5170-5198.
- Decreto-Lei nº 46 (2008). Estabelece o regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras ou demolições de edifícios ou de derrocadas, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolhas, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação. D.R I Série. 51 (08-03-12). 1567-1574.
- Decreto-Lei nº 488 (1985). D.R I Série. 271 (85-11-25). 1567-1574.
- Decreto-Lei nº 73 (2011). Estabelece o regime geral aplicável à prevenção, produção e gestão de resíduos. D.R I Série. 116 (11-06-17). 3251-3300.



- Delgado Rodrigues (1986). *Contribuição para o estudo das rochas carbonatadas e para a sua classificação geotécnica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Deng, X., Liu, G. e Hao, J. (2008). A study of construction and demolition waste management in Hong Kong. *The 4<sup>th</sup> International Conference on Wireless communications, Networking and Mobile Computing*, Dalian, China, 12-14 October. B-ON Database.
- Dhakal, G. P., Kodama, J., Yoneda, T., Neaupane, K. M. e Goto, T. (2004). Durability characteristics of some assorted rocks. *Journal of cold Regions Engineering*, vol. 18 (3), pp. 110-122. ASCE American Society of Civil Engineers Database.
- Dos Santos, E. C. G (2007). *Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 168 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-10042007-110106/pt-br.php>> [consultado em abril de 2011].
- Duarte, I. M. R. (2002). *Solos residuais de rochas granitoides a sul do tejo: Características geológicas e geotécnicas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Évora, Évora. 373 p. Disponível em: <<http://home.uevora.pt/~lopes/Artigos/28.pdf>> [consultado em outubro de 2011].
- Ducman, V. e Mladenovic, A. (2011). The potential use of steel slag in refractory concrete. *Materials Characterization*, vol. 62 (7), pp 716-723. Science Direct Database.
- EEA. (2009). Environmental Terminology and Discovery Service. European Environment Agency. Disponível em: <[http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept\\_html?term=construction%20and%20demolition%20waste](http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=construction%20and%20demolition%20waste)> [consultado em junho de 2012].
- EN 12407 (2007). *Natural stone test methods - Petrographic examination*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- Erguler, Z. A. e Ulusay, R. (2009). Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: disintegration index test and new durability classification chart. *Engineering Geology*, vol. 105 (1-2), pp. 11-19. Science Direct database.
- Esteves, A. M., Martins, I. e Coelho, S. (2008). Caracterização ambiental de resíduos de construção e demolição. *50º Congresso Brasileiro do Concreto*, Salvador, Brasil.
- Etxeberria, M. (2004). *Experimental study on microstructure and structural behavior of recycled aggregate concrete*. Ph.D Thesis, Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports da Univeritat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain. 230 p. Disponível em: <<http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6158/01Mel01de02.pdf?sequence=1>> [consultado em maio de 2012].
- Etxeberria, M., Vazquez, E., Marí, M. e Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 37 (5), pp. 735-742. B-ON Database.
- EUROSLAG. (2008). Statistics 2008. EUROSLAG. Disponível em: <<http://www.euroslag.org/products/statistics/2008/>> [consultado em abril de 2011].
- Fatta, D., Papadopoulos, A., Avramikos, E., Sgourou, E., Moustakas, K., Kourmoussis, F., Mentzis, A. e Loizidou, M. (2003). Generation and management of construction and demolition waste in Greece - an existing challenge. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 40 (1), pp. 81-91. Science Direct Database.

- Fernandes, E. F., Gomes, S. e Gonçalves, F. (2009). Agregados reciclados para camadas não ligadas, a aplicar em leito do pavimento: Controlo da qualidade aplicado no aeroporto de Lisboa. *Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas*, Aveiro, 28-29 de setembro.
- Ferreira, J. F. B. (2009). *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas de sub-base não ligadas de estradas de baixo tráfego*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 57 p. Disponível em: <<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/578135/1/Dissertacao.pdf>> [consultado em junho 2011].
- Ferreira, S. M. R. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares - Aplicação às escórias de aciaria nacionais*. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. 283 p. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/12264>> [consultado em fevereiro de 2011].
- FIR. (2003). Recycling products from mineral construction and demolition waste and mixed construction and demolition waste: Basic information for administrative bodies, engineers, construction contractors and other users. Disponível em: <<http://www.fir-recycling.nl/English/F.I.R.%20paper%20on%20product%20definitions.pdf>> [consultado em março de 2012].
- Fortunato, E., Lopes, M. L., Curto, P. e Fonseca, A. (2009). Valorização dos resíduos de construção e demolição em obras geotécnicas. *Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas*, Aveiro, 28-29 de setembro.
- Franklin Associates. (1998). *Characterization of building-related construction and demolition debris in the United States*. The U.S. Environmental Protection Agency, Municipal and Industrial Solid Division, Office of Solid Waste, Report N° EPA530-R-98-010, Kansas, United States of America. Disponível em: <<http://infohouse.p2ric.org/ref/02/01095.pdf>> [consultado em janeiro de 2012].
- Freire, A. C. (2011). Enquadramento normativo dos RCD. *Curso FUNDEC-LNEC - Utilização de agregados reciclados em infraestruturas de transportes*, 2ª ed, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- Freire, A. C., Neves, J. M. e Pestana, R. (2010). Analysis of recycled aggregates properties for unbound granular asphalt pavement layers. *The 11<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements*, Nagoya, Japan, 1-6 August.
- Freire, A. C., Neves, J. M., Roque, A. J., Martins, I. M., Antunes, M. L. e Faria, G. (2011). Sustainable application of construction and demolition recycled materials (C&DRM) in road infrastructures. *The 1<sup>st</sup> International Conference WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, Guimarães, 12-14 September.
- Fundación Labien. (2004). Guia metodológica para la elaboración de proyectos de demolición selectiva en la comunidad autónoma del País Vasco. IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, País Vasco, España. Disponível em: <<http://www.ihobe.net/Publicaciones/ficha.aspx?IdMenu=750e07f4-11a4-40da-840c-0590b91bc032&Cod=ed4b56b3-7788-44db-9e38-e9e0f003b6b9&Tipo=>>> [consultado junho 2011].
- Galvín, A. P., Ayuso, J., Jiménez, J. R. e Agrela, F. (2012). Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes. *Waste Management*, vol. 32 (1), pp. 88-95. Science Direct Database.
- Gamble, J. C. (1971). *Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rock*. PhD Thesis, University of Illinois, Chicago, United States of America.

- Gayarre, F. L. (2008). *Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas*. Tese de Doutoramento, Universidad de Oviedo, Oviedo, Espanha. 310 p.
- Geyer, R. M. T. (2001). *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. 187 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/1508>> [consultado em junho de 2011].
- Gomes Correia, A., Roque, A. J., Ferreira, S. M. R. e Fortunato, E. (2012). Case Study to Promote the Use of Industrial Byproducts: The Relevance of Performance Tests. *Journal of ASTM International*, vol. 9 (2), pp. 1-18.
- Gomes, C. M. B. da C. (2008). *Estudo do comportamento de aterros de resíduos. Caracterização física, BIO Intelligence Servicequímica e mecânica dos resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 536 p. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11054>> [consultado em maio de 2011].
- Gomes, R. L. (2001). *Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da bacia de Paraná*. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 295 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-01072008-104439/pt-br.php>> [consultado em outubro de 2011].
- Gonçalves, P. C. M. (2007). *Betão com agregados reciclados: Análise comentada da legislação existente*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 110 p. Disponível em: <<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/144861/1/DISSERTACAO.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- Gourc, J. P. e Staub, M. J. (2010). The BIO Intelligence Service-hydro-mechanical behavior of MSW (Municipal Solid Waste) and the improvement of landfill environmental sustainability. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, New Delhi, India, 8-12 November, vol. 1, pp. 24-39.
- Graffitti, D. F. (2002). *Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. 77 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4001>> [consultado em maio de 2011].
- Guimarães, P. (2004). Contribuição para a história da Siderurgia Nacional. 22<sup>o</sup> *Encontro da Associação Portuguesa de história Económica e Social*, Aveiro, 15-16 Novembro. Disponível em: <<http://www2.egi.ua.pt/xxiaphes/Artigos/a%20Guimar%C3%A3es.PDF>> [consultado em abril de 2011].
- Gupta, A. S. e Seshagiri Rao, K. (2000). Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial. *Engineering Geology*, vol. 56 (3-4), pp. 257-274. Science Direct Database.
- Gupta, J. D., Kneller, W. A., Tamarisa, R. e Skrzypczak-Jankun, E. (1994). Characterization of base and subbase iron and steel slag aggregates causing deposition of calcareous tufa in drains. *Transportation research record*, nº 1434, pp. 8-16.
- Gupta, V. e Ahmed, I. (2007). The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. *Engineering Geology*, vol. 95 (3-4), pp. 79-87. Science Direct Database.
- Hall, K. e Hall, A. (1996). Weathering by wetting and drying: Some experimental results. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 21 (4), pp. 365-376. Onlinelibrary Wiley Database.

- Heerten, G. (2010). The new German landfill directive and environmental advantage of using geosynthetics in landfill sealing systems. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, New Delhi, India, 8-12 November, vol. 1, pp 282-295.
- Huang, Y., Bird, R. N. e Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 52 (1), pp. 58-73. Science Direct Database.
- Hurd, J. O. (1998). Effect of slag type on tufa precipitate formation. *Transportation research record*, nº 1192, pp. 79-84.
- Iacobescu, R. I., Koumpouri, D., Pontikes, Y., Saban, R. e Angelopoulos, G. N. (2011). Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 196, pp 287-294. Science Direct Database.
- ISRM (1977). *Part 2 - Suggested method for Determination of the Slake-Durability Index*. Commission on testing methods, Pergamon Pres
- Jadovski, I. (2005). *Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 178 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10156>> [consultado em maio de 2011].
- Jeremias, F. T. (1991). *Importância da expansibilidade na durabilidade dos materiais rochosos e técnicas laboratoriais para a sua avaliação*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 220 p.
- Jeremias, F. T. (2000). *Geological controls on the engineering properties of mudrocks of the north Lisbon area*. Ph.D Thesis, University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom.
- JRC-IES. (2011). *Supporting environmentally sound, decisions for construction and demolition (C&D) waste management: A practical guide to life cycle thinking (LCT) and life cycle assessment (LCA)*. Disponível em: <<http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/D4B-Guide-to-LCTLCA-for-C-D-waste-management-Final-ONLINE.pdf>> [consultado em março de 2011].
- Kerr, P. F. (1977). *Optical Mineralogy*. McGraw-Hill, Inc., United States of America.
- Kneller, W. A., Gupta, J., Borkowski, M, L. e Dollimore, D. (1994). Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis. *Transportation research record*, nº 1434, pp. 17-22.
- Kolay, E. e Kayabali, K. (2006). Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach. *Engineering Geology*, vol. 86 (4), pp. 271-284. Science Direct Database.
- Leite, F. da C. (2007). *Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 185 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-09012008-162141/pt-br.php>> [consultado em abril de 2011].
- Leite, F. da C., Motta, R. dos S., Vasconcelos, K. L. e Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, vol. 25 (6), pp. 2972-2979. Science Direct Database.
- Leite, M. B. (2001). *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 270 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/21839>> [consultado em abril de 2011].

- LERO-PE01 (1993). *Ensaio de determinação da porosidade acessível à água, das massas volúmicas e do teor máximo em água de absorção*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Levy, J. de Q. e Cabeças, A. J. (2006). *Resíduos sólidos urbanos: Princípios e processos*, 1ª edição, EAPSA, Lisboa.
- Liapis, I. e Likoydis, S. (2012). Utilisation de laitiers d'aciérie de four électrique en enrobé bitumineux en couche mince anti-dérapante. *Laitiers Sidérurgiques*, nº 99, pp 9-21.
- Limbachiya, M. C., Marrocchino, E. e Koulouris, A. (2006). Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*, vol. 27 (2), pp. 201-208. Science Direct Database.
- LNEC (2012). Marcação CE. Disponível em: <[http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/marcacao\\_ce](http://www.lnec.pt/qpe/marcacao/marcacao_ce)> [consultado em agosto de 2012].
- LNEC 71 (2010). *Gestão dos resíduos de construção e demolição: Estudo comparativo Brasil-Portugal*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 227 (2008). *Caracterização de agregados reciclados de acordo com o Normativo Europeu prEN 933-11*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 471 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 472 (2009). *Guia para a reciclagem de mistura betuminosas a quente em central*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 473 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 474 (2009). *Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEG. (2012). Geolex: Léxico de termos geológicos. Disponível em: <[http://geoportal.lneg.pt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=53&Itemid=4&lg=pt](http://geoportal.lneg.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=4&lg=pt)> [consultado em agosto de 2012].
- Lopes, M da C. (2006). *Comportamento geotécnico e mecanismos de ruptura em rochas brandas: mina córrego do sítio*. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. 94 p. Disponível em: <[http://www.tede.ufop.br/tde\\_arquivos/15/TDE-2006-11-28T08:35:10Z-99/Publico/Manoel%20da%20Conceicao%20Lopes.pdf](http://www.tede.ufop.br/tde_arquivos/15/TDE-2006-11-28T08:35:10Z-99/Publico/Manoel%20da%20Conceicao%20Lopes.pdf)> [consultado em setembro de 2011].
- Lopes, M. de G. e Barroso, M. (2011a). Dimensionamento de sistemas de confinamento e drenagem: geossintéticos. *Curso FUNDEC-LNEC - Geotecnia ambiental*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- Lopes, M. de G. e Barroso, M. (2011b). Aterro de resíduos sólidos: Conceção. *Curso FUNDEC-LNEC - Geotecnia ambiental*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [CD-ROM].
- Lourenço, C. (2007). *Otimização de Sistemas de demolição - Demolição seletiva*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 112 p. Disponível em: <<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/143697/1/Documento%20Dissertacao.pdf>> [consultado em março de 2011].



- Machado, C. F. (2004). *Avaliação da presença de microrganismos indicadores de contaminação e patogênicos em líquidos lixiviados do aterro sanitário de Belo Horizonte*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil. 125 p. Disponível em <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/ENGD-66ZQFH>> [consultado em outubro de 2011].
- Machado, A. T. (2000) *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para a avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 135 p. Disponível em: <[http://recycled.pcc.usp.br/ftp/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Alexandre%20MachadoP.pdf](http://recycled.pcc.usp.br/ftp/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Alexandre%20MachadoP.pdf)> [consultado em abril de 2011].
- Maia, P. C. de A. (2001). *Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 272 p. Disponível em: <[http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=2075@1](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=2075@1)> [consultado em outubro de 2011].
- Mália, M. (2010). *Indicadores de resíduos de construção e demolição*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 124 p. Disponível em: <<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/742685/1/Indicadores%20de%20residuos%20de%20construcao%20e%20demolicao.pdf>> [consultado em março de 2011].
- Manassero, M., Parker, R., Pasqualini, E., Szabò, I., Almeida, M. S. S., Bouazza, A., Daniel, D.E. e Rowe, R. K. (1998). Controlled landfill design (geotechnical aspects). *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 8-12 September, vol. 3, pp. 1001-1038.
- Marques, E. A. G., Barroso, E. V., Menezes Filho, A. P. e Vargas Jr, E. do A. (2010). Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro - Physical, mineralogical and geomechanical characterization. *Engineering Geology*, vol. 111 (1-4), pp. 1-18. Science Direct Database.
- Martinho, F., Jacinto, L., Gonçalves, J. e Mimoso, P. (2008b). A valorização e reutilização de resíduos da construção e demolição (RC&D) em pavimentos rodoviários. *5º Congresso Rodoviário Português*, Estoril, 12-14 de março.
- Martinho, F., Martinho, A. e Gonçalves, J. (2008c). Utilização de resíduos da construção e demolição (RC&D) em arruamentos urbanos: o caso de Troia. *5º Congresso Rodoviário Português*, Estoril, 12-14 de março.
- Martinho, G., Santana, F., Santos, J., Brandão, A. e Santos, I. (2008a). *Gestão e tratamento de lixiviados produzidos em aterros sanitários de resíduos urbanos*. Relatório nº3/2008, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 294 p. Disponível em: <<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?Section=MenuPrincipal&GenericContentId=0&FolderPath=\Root\Contents\Sitio\MenuPrincipal\Documentacao&SubFolderPath=\Root\Content\Sitio\MenuPrincipal\Documentacao\Publicacoes\IRAR>> [Consultado abril de 2011].
- Martin-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A. e Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, vol. 25 (2), pp. 742-748. Science Direct Databases.
- Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M, Ibrahim, M. e Barry, M. S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, vol. 17 (2), pp. 105-112. Science Direct Databases.

- Masuero, A. B., Vilela, A. C. e Dal Molin, D. (2000). Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. *Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais*, São Paulo, Brasil, 28-31 de Agosto. Disponível em: <<ftp://ftp.cefetes.br/Cursos/MetalurgiaMateriais/Joseroberto/P%D3S/NORMAS,%20ARTIGOS%20E%20EXERC%20CDCIOS/ACIARIA%20EL%C9TRICA.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- Ministerio de medio ambiente y agua. (2010). Guía para la implementación, operación y cierre de rellenos sanitarios, 1ª ed, Bolívia. Disponível em: <<http://www.emagua.gob.bo/bmmaya/DOCS/OTROS/RESIDUOS%20SOLIDOS%20-%20VAPSB%20dic2010/Guia%20Rellenos%20Sanitarios.pdf>> [consultado em junho de 2011].
- Montecinos, W. e Holda, A. (2006). Construction and demolition waste management in Denmark. Disponível em <[http://cowam.tec-hh.net/Denmark\\_CD\\_Waste.pdf](http://cowam.tec-hh.net/Denmark_CD_Waste.pdf)> [consultado em Agosto de 2012].
- Moon, V. e Jayawardane, J. (2004). Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu basalt, New Zealand. *Engineering Geology*, vol. 74 (1-2), pp. 57-72. Science Direct Database.
- Motz, H. e Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*, vol. 21 (3), pp. 285-293. Science Direct Databases.
- Neves, J. (2011). Tipos de RCD e potencial de aplicação em infraestruturas de transporte. *Curso FUNDEC-LNEC - Utilização de agregados reciclados em infraestruturas de transportes*, 2ª ed, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- NEWMOA. (2009). *Construction & Demolition Waste Management in the Northeast in 2006*. Disponível em: <<http://www.newmoa.org/solidwaste/CDReport2006DataFinalJune302009.pdf>> [consultado em janeiro de 2012].
- NiSA. (2012). About iron a and steel slag. Nippon Slag Association. Disponível em: <<http://www.slg.jp/e/slag/index.html>> [Consultado em junho de 2012].
- NP EN 932-3 (2010). *Ensaio das propriedades gerais dos agregados - Parte 3: Método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada*. Instituto Português de Qualidade, Almada.
- NSA. (2009a). General information about NSA. National Slag Association. Disponível em: <<http://www.nationalslag.org/nsageneral.htm>> [consultado em abril de 2011].
- NSA. (2009b). Steel slag Base and sub-base aggregates. National Slag Association. Disponível em: <<http://www.nationalslag.org/nsageneral.htm>> [consultado em abril de 2011].
- NSA. (2009c). Steel slag - A premier construction aggregate. National Slag Association. Disponível em: <<http://www.nationalslag.org/nsageneral.htm>> [consultado em abril de 2011].
- Ozsoy, E. A., Yilmaz, G. e Arman, H. (2010). Physical, mechanical and mineralogical properties of ophiolitic rocks at the Yakakayi dam site, Eskisehir, Turkey. *Scientific Research and Essays*, vol. 5 (17), pp. 2579-2587. Disponível em: <<http://www.academicjournals.org/sre/pdf/pdf2010/4Sep/Ozsoy%20et%20al.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- Pacheco Torgal, F. e Castro-Gomes, J. P. (2006). Influence of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregates on the durability of a C20/25 strength class concrete. *Construction and building Materials*, vol. 20 (10), pp. 1079-1088. Science Direct Database.

- Pasetto, M. e Baldo, N. (2010). Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181 (1-3), pp. 938-948. Science Direct Database.
- Pellegrino, A. e Prestininzi, A. (2007). Impact of weathering on the geomechanical properties of rocks along thermal metamorphic contact belts and morpho-evolutionary processes: The deep-seated gravitational slope deformations of Mt. Granieri–Salincriti (Calabria–Italy). *Geomorphology*, vol. 87 (3), pp 176-195. Science Direct Database.
- Pereira, F. J. M. A. [sd]. Aterro Sanitário de RSU: Processos, Tecnologias e Impactos. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/25507473/Aterro-sanitario-de-RSU-Processos-tecnologias-e-impactos>> [consultado abril de 2011].
- Pereira, J. P. e Coelho, M. de F. G. C. (2000). Aterros sanitários: Estudos de contaminação dos solos por lixiviados. *7º Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto, 10-13 de abril.
- Pereira, L. H., Jalali, S. e Aguiar, B. (2004). Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. Disponível em: <[http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3046/1/Gest%C3%A3o\\_RCD.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3046/1/Gest%C3%A3o_RCD.pdf)> [consultado em setembro de 2011].
- Pestana, R. M. M. (2008). *Contribuição para o estudo do comportamento mecânico de resíduos de construção e demolição aplicados em estradas de baixo tráfego*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 115 p. Disponível em: <[https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/232011/1/Pestana\\_2008.pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/232011/1/Pestana_2008.pdf)> [consultado em junho de 2011].
- Pinho, A. B. de (2003). *Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Évora, Évora. 272 p. Disponível em: <<http://home.uevora.pt/~lopes/Artigos/29.pdf>> [consultado em setembro de 2011].
- Plural. (2004). 1ª Revisão do Plano Diretor Municipal de Vila Franca de Xira: Análise e diagnóstico: Caderno III - Caracterização Biofísica. Disponível em: <<http://www.cm-vfxira.pt/files/3/documentos/20091126141757809367.pdf>> [consultado em fevereiro de 2012].
- Polisseni, A. E. (2005). *Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. 220 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4497>> [consultado em maio de 2011].
- Portaria nº 209 (2004). Lista Europeia de Resíduos (LER). Ministério da Economia, da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas, do Ordenamento do Território e Ambiente. Lisboa, Diário da Republica, I série B – N.º 53, pág. 1188. Disponível em: <[http://www.ersuc.pt/web/index.php?option=com\\_content&view=article&id=101&Itemid=29](http://www.ersuc.pt/web/index.php?option=com_content&view=article&id=101&Itemid=29)> [consultado em março de 2011].
- Puy, J. H. (2007). *Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico*. Tese de Doutoramento, Departament d'Enginyeria de la Construcció da Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha. 89 p. Disponível em: <<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/6095>> [consultado em abril de 2011].
- Quinta Ferreira, M. de O. (1990). *Aplicação da geologia de engenharia ao estudo de barragens de enrocamento*. Tese de Doutoramento, Instituto Nacional de Investigação Científica da Universidade de Coimbra, Coimbra. 322 p.
- Rao, A., Jha, K. N. e Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50 (1), pp. 71-81. Science Direct Database.



- Regueiro, E. C. G. (2006). *Avaliação da influência de diferentes configurações das camadas dos aterros na formação dos lixiviados*. Projeto de Licenciatura, Universidade Fernando Pessoa, Porto. 67 p. Disponível em: <<http://ufpbdigital.ufp.pt/dspace/handle/10284/260>> [consultado em maio de 2011].
- Riscado, J. V. (2011). *Gestão de resíduos de construção e demolição. Curso FUNDEC-LNEC - Geotecnia ambiental*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- Rodhe, L. (2002). *Escórias de aciaria elétrica em camadas granulares em pavimentos - Estudo laboratorial*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 101 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3878/000345108.pdf?sequence=1>> [consultado em maio de 2011].
- Rodríguez, G., Alegre, F. J. e Martínez, G. (2007). The contribution of environmental management systems to the management of construction and demolition waste: The case of Autonomous Community of Madrid (Spain). *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50 (3), pp. 334-349. Science Direct Database.
- Rodríguez, J. A. (2007). La porosidad de las rocas carbonatadas. Material de apoio da disciplina “Rocas ornamentales, durabilidad y conservación” da universidad de Oviedo, Oviedo, Espanha. Disponível em: <<http://petro.uniovi.es/default.html>> [consultado em fevereiro de 2012].
- Roque, A. J. (2011a). Construção das camadas de confinamento e de drenagem: Materiais Naturais. *Curso FUNDEC-LNEC - Geotecnia ambiental*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- Roque, A. J. (2011b). Dimensionamento de sistemas de confinamento e de drenagem: Materiais Naturais. *Curso FUNDEC-LNEC - Geotecnia ambiental*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- Roque, A. J. (2011c). Valorização de resíduos - Aplicações e casos de obra. *Curso FUNDEC-LNEC - Geotecnia ambiental*. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- Roque, A. J., Castro, F., Gomes Correia, A., Silva, S. e Cavalheiro, A. (2010). Laboratory and field leaching tests for predicting the environmental impact of Portuguese steel slag. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, New Delhi, India, 8-12 November, vol. 2, pp. 1166-1171.
- Roque, A. J., Gomes Correia, A., Fortunato, E., Pardo de Santayana, F., Ferreira, S. M. R. e Trigo, F. (2006). A geotecnia na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados - Um projecto nacional. *12<sup>o</sup> Encontro Nacional do Saneamento Básico*, Cascais, 24-27 de outubro [em CD-ROM].
- Rowe, R. K. e Yu, Y. (2010). Factors affecting the clogging of leachate collection systems in MSW landfills. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, New Delhi, India, 8-12 November, vol. 1, pp. 3-23.
- Ruivo, J. e Veiga, J. (2004). *Resíduos de construção e demolição: estratégia para um modelo de gestão*. Relatório Final de Licenciatura, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 60 p. Disponível em: <[http://residuos.quercus.pt/xFiles/scContentDeployer\\_pt/docs/DocSite1162.pdf](http://residuos.quercus.pt/xFiles/scContentDeployer_pt/docs/DocSite1162.pdf)> [consultado em junho de 2011].

- Russo, M. A. T. (2005). *Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário*. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. 298 p. Disponível em <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/7126>> [consultado em maio de 2011].
- Russo, M. A. T. (2003). *Tratamento de resíduos sólidos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 196 p. Disponível em: <<http://homepage.ufp.pt/madinis/RSol/Web/TARS.pdf>> [consultado em maio de 2011].
- SAMARIS. (2004). *Literature review of recycling of by-products in road construction in Europe*. A Growth project in the 5th Framework Programme for Research and Technological Development of the European Union, 2003. Disponível em: <[http://www.fehrl.org/index.php?m=32&mode=download&id\\_file=790](http://www.fehrl.org/index.php?m=32&mode=download&id_file=790)> [consultado em janeiro de 2012].
- Sharma, P. K. e Singh, T. N. (2008). A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 67 (1), pp. 17-22. Springerlink Database.
- Shi, C. (2004). Steel Slag - Its production, processing, characteristics and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16 (3), pp. 230-236. ASCE: American Society of Civil Engineers Database.
- Silva, M. E. (2007). *Avaliação da susceptibilidade de rochas ornamentais e de revestimentos à deterioração: Um enfoque a partir do estudo em monumentos do barroco mineiro*. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil. 125 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/MPBB-76ZJ33>> [consultado em setembro de 2011].
- Simão, A. P. J. F. e Borges, A. J. B. (2009). Enquadramento legislativo da valorização de resíduos. *Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas*, Aveiro, 28-29 de setembro.
- Simão, J. A. dos R. S. (2003). *Rochas ígneas como pedra ornamental - Causas, condicionantes e mecanismos de alteração. Implicações tecnológicas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 182 pp.
- Sofilic, T., Rastovcan-Mioc, A., Cosic, M., Merle, V., Mioc, B. e Sofilic, U. (2010). Eaf steel slag application possibilities in Croatian asphalt mixture production. *4<sup>th</sup> International Conference on Safety & Environment in Process Industry*, Florence, Italy, 14-17 March. Disponível em: <<http://www.aidic.it/CISAP4/webpapers/16Sofilic.pdf>> [consultado em janeiro de 2012].
- Sorlini, S., Sanzeni, A. e Rondi, L. (2012). Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 209-210, pp 84-91. Science Direct Database.
- Sousa, H., Sousa Coutinho, J., Faria, J., Figueiredo, F. e Sousa, R. (2004). Construction and demolition waste in the region of Porto - Portugal: management and survey. *Internation RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Espanha, 8-11 November, pp. 226-234. Disponível em: <<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/admin/Files/FilePaper/p267.pdf>> [consultado em agosto de 2011].
- Sousa, M. J. N. e Monteiro, B. P. B. (2009). Do princípio do equilíbrio dos materiais ao plano de gestão de resíduos. *Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas*, Aveiro, 28-29 de setembro.

- Souto, G. I de A. B. (2009). *Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping")*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 371 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19022009-121756/es.php>> [consultado em maio de 2011].
- Statistics Norway. (2012). Waste from building activities, 2010. Disponível em: <<http://www.ssb.no>> [Consultado em junho de 2012].
- Sumner, P. D., Hall, K. J., Van Rooy, J. L. e Meiklejohn, K. L. (2009). Rock weathering on the eastern mountains of southern Africa: Review and insights from case studies. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 55 (5), pp. 236-244. Science Direct Database.
- Symonds Group Report to DGXI. (1999). *Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts*. European Commission, London. 43 p. Disponível em: [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw\\_chapter1-6.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter1-6.pdf) [consultado em maio de 2012].
- Tam, V. W. Y., Wang, K. e Tam, C. M. (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152 (2), pp. 703-714. Science Direct Database.
- Tenório, J. J. I. (2005). *Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, Brasil. 138 p. Disponível em: <[http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes\\_arquivos/Dissertacoes/Jonathas%20Juda%20Lima%20Tenorio.pdf](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Jonathas%20Juda%20Lima%20Tenorio.pdf)> [consultado em setembro de 2011].
- Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., Tsvilis, S. e Koroneos, C. (2008). Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal Hazardous Materials*, vol. 152 (2), pp 805-811. Science Direct Database.
- Tugrul, A. (2004). The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*, vol. 75 (3-4), pp. 215-227. Science Direct Database.
- UBA (2008). *Aggregates Case Study: Final Report*. Vienna, Austria. 258 p. Disponível em: <[http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/waste/documents/Aggregates\\_Case\\_Study\\_Final\\_Report\\_UBA\\_080331.pdf](http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/waste/documents/Aggregates_Case_Study_Final_Report_UBA_080331.pdf)> [Consultado em abril de 2012].
- UNISINOS. (2009). *Resíduos Sólidos: Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras*. PROSAB, ABES. ISBN 978-85-7022-163-6, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/produtos.htm>> [consultado em outubro de 2011].
- Van Impe, W. F. (1998). Environmental geotechnics: ITC 5 activities. *Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 8-12 September, vol. 4, pp. 1163-1188.
- Vegas, I., Ibañez, J. A., San José, J. T. e Urzelai, A. (2008). Construction demolition wastes, waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction. *Waste Management*, vol. 28 (3), 565-575 pp. Science Direct Database.
- Viterbo, V., McLemore, V., Donahue, K., Aimone-Martin, C., Fakhimi, A. e Sweeney, D. (2007). Effects Of Chemistry, Mineralogy, Petrography And Alteration On Rock Engineering Properties Of The Goathill North Rock Pile At The Molycorp Questa Mine, New Mexico. *SME Annual Meeting*, Utah, United States of America, 25-28 February. Disponível em: <[http://geoinfo.nmt.edu/staff/mclemore/documents/07-099\\_10.pdf](http://geoinfo.nmt.edu/staff/mclemore/documents/07-099_10.pdf)> [consultado em setembro de 2011].

- Wang, G., Wang, Y. e Gao, Z. (2010). Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. *Journal of Hazardous Materials*, vol.184 (1-3), pp. 555-560. Science Direct Database.
- Wang, Q., Yan, P. e Feng, J. (2011). A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions. *Journal of Hazardous Materials*, vol.186 (2-3), pp. 1070-1075. Science Direct Database.
- Warke, P. A. e Smith, B. J. (1998). Effects of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests. *Geomorphology*, vol. 22 (3-4), pp. 347-357. Science Direct Database.
- Worldsteel Association. (2011). Steel Statistical Yearbook 2011. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive/Steel-statistical-yearbook-2011/document/Steel%20statistical%20yearbook%202011.pdf>> [consultado em abril de 2012].
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. e Chen, Y (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, vol. 42 (7), pp. 2580-2585. Science Direct Database.
- Yagiz, S. (2010). Correlation between slake durability and rock properties for some carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 70 (3), pp. 377-383. Springerlink Database.
- Zbyszewski, G. (1964). Notícia explicativa da Folha 34-B - Loures.
- Zhao, W., Leefink, R. B. e Rotter, V. S. (2010). Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China - The case of Chongqing. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54 (6), pp. 377-389. Science Direct Database.

## **ANEXOS**

## Anexo I - Definição dos diversos tipos de resíduos sólidos (adaptado de DL nº 73/2011)

Designação		Definição
<b>Resíduo</b>		"Quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer."
<b>Resíduos sólidos</b>	<b>Classificação segundo a origem</b>	<b>Resíduos urbanos</b>
		"O resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações."
		<b>Resíduos industriais</b>
		"O resíduo gerado em processos produtivos industriais, bem como o que resulte das atividades de produção e distribuição de eletricidade, gás e água."
		<b>Resíduos hospitalares</b>
		"Os resíduos resultantes de atividades de prestação de cuidados de saúde a seres humanos ou a animais, nas áreas da prevenção, diagnóstico, tratamento, reabilitação ou investigação e ensino, bem como de outras atividades envolvendo procedimentos invasivos, tais como acupuntura, <i>piercings</i> e tatuagens."
		<b>Resíduos de origem agrícola</b>
		"O resíduo proveniente de exploração agrícola e ou pecuária ou similar."
	<b>Classificação segundo as características</b>	<b>Outros tipos de resíduos</b>
		"Todos os outros não incluídos nos tipos anteriores. Referem-se a pneus usados, pilhas e acumuladores, óleos usados, equipamentos elétricos e eletrónicos, veículos em fim de vida, resíduos de construção e demolição e lamas."
		<b>Resíduos inertes</b>
		"O resíduo que não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas importantes e, em consequência, não pode ser solúvel nem inflamável, nem ter qualquer outro tipo de reação física ou química, e não pode ser biodegradável, nem afetar negativamente outras substâncias com as quais entre em contacto de forma suscetível de aumentar a poluição do ambiente ou prejudicar a saúde humana, e cujos lixiviabilidade total, conteúdo poluente e ecotoxicidade do lixiviado são insignificantes e, em especial, não põem em perigo a qualidade das águas superficiais e ou subterrâneas."
		<b>Resíduos perigosos</b>
		"Resíduos que apresentam uma ou mais das características de perigosidade..." especificadas no DL nº 73/2011.
		<b>Resíduos não perigosos</b>
		"Resíduos não abrangidos na definição de resíduos perigosos. Inclui os resíduos biodegradáveis que são os que podem ser sujeitos a decomposição anaeróbia ou aeróbia como, por exemplo, os resíduos alimentares e de jardim, o papel e o cartão."

## Anexo II - Definição de alguns termos apresentados no DL nº 73/2011 (adaptado de DL nº 73/2011)

<b>Designação</b>	<b>Definição</b>
<b>Abandono</b>	"A renúncia ao controlo de resíduos sem qualquer beneficiário determinado, impedindo a sua gestão."
<b>Armazenagem</b>	"A deposição controlada de resíduos, antes do seu tratamento e por prazo determinado (...)."
<b>Armazenagem preliminar</b>	"A deposição controlada de resíduos, no próprio local de produção, por período não superior a um ano, antes da recolha, em instalações onde os resíduos são produzidos ou descarregados a fim de serem preparados para posterior transporte para outro local para efeitos de tratamento."
<b>Eliminação</b>	"Qualquer operação que não seja de valorização (...), ainda que se verifique como consequência secundária a recuperação de substâncias ou de energia."
<b>Gestão de resíduos</b>	"A recolha, o transporte, a valorização e a eliminação de resíduos, incluindo a supervisão destas operações, a manutenção dos locais de eliminação no pós -encerramento, bem como as medidas adotadas na qualidade de comerciante ou corretor."
<b>Prevenção</b>	"A adoção de medidas antes de uma substância, material ou produto assumir a natureza de resíduo, destinadas a reduzir: (1) a quantidade de resíduos produzidos, designadamente através da reutilização de produtos ou do prolongamento do tempo de vida dos produtos; (2) os impactes adversos no ambiente e na saúde humana resultantes dos resíduos produzidos ou (3) o teor de substâncias."
<b>Produtor de resíduos</b>	"Qualquer pessoa, singular ou coletiva, cuja atividade produza resíduos (produtor inicial de resíduos) ou que efetue operações de pré-processamento, de mistura ou outras que alterem a natureza ou a composição desses resíduos."
<b>Produtor do produto</b>	"Qualquer pessoa, singular ou coletiva, que desenvolva, fabrique, embale ou faça embalar, transforme, trate, venda ou importe produtos para o território nacional no âmbito da sua atividade profissional."
<b>Reciclagem</b>	"Qualquer operação de valorização, incluindo o reprocessamento de materiais orgânicos, através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins mas que não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento."
<b>Reutilização</b>	"Qualquer operação mediante a qual os produtos ou componentes que não sejam resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para que foram concebidos."
<b>Tratamento</b>	"Qualquer operação de valorização ou de eliminação de resíduos, incluindo a preparação prévia à valorização ou eliminação e as atividades económicas, (...), do qual faz parte integrante."
<b>Triagem</b>	"O ato de separação de resíduos mediante processos manuais ou mecânicos, sem alteração das suas características, com vista ao seu tratamento."
<b>Valorização</b>	"Qualquer operação, (...), cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico ou a preparação dos resíduos para esse fim na instalação ou conjunto da economia."

## Anexo III - Princípios gerais de gestão de resíduos definidos no DL nº 73/2011 (adaptado de DL nº 73/2011)

Designação (artigo)	Definição
<b>Princípios da autossuficiência e da proximidade (art.º 4)</b>	<p>1 - “As operações de tratamento devem decorrer em instalações adequadas com recurso às tecnologias e métodos apropriados para assegurar um nível elevado de proteção do ambiente e da saúde pública, preferencialmente em território nacional e obedecendo a critérios de proximidade.”</p> <p>2 - “A Autoridade Nacional de Resíduos - ANR, pode interditar as transferências de resíduos de e para o território nacional, nos termos do Regulamento (CE) nº 1013/2006, dos PCE, de 14 de junho, executado na ordem jurídica interna pelo DL nº 45/2008, de 11 de março.”</p> <p>3 - “A ANR pode ainda para proteger a rede de instalações nacional e, em derrogação do disposto no Regulamento (CE) nº 1013/2006, dos PCE, (...), limitar as entradas de resíduos destinados a incineradoras, que sejam classificadas como operações de valorização, caso se verifique que tais entradas implicam a eliminação dos resíduos nacionais ou o tratamento desses resíduos de modo incompatível com os respetivos planos de gestão de resíduos.”</p>
<b>Princípio da responsabilidade pela gestão (art.º 5)</b>	<p>1 - “A responsabilidade pela gestão dos resíduos (...) cabe ao produtor inicial dos resíduos, sem prejuízo de poder ser imputada, na totalidade ou em parte, ao produtor do produto que deu origem aos resíduos e partilhada pelos distribuidores desse produto se tal decorrer de legislação específica aplicável.”</p> <p>2 - “Excetuam -se do disposto no número anterior os resíduos urbanos cuja produção diária não exceda 1100 l por produtor, caso em que a respetiva gestão é assegurada pelos municípios.</p> <p>3 - “Em caso de impossibilidade de determinação do produtor do resíduo, a responsabilidade pela respetiva gestão recai sobre o seu detentor.”</p> <p>4 - “Quando os resíduos tenham proveniência externa, a sua gestão cabe ao responsável pela sua introdução em território nacional, salvo nos casos expressamente definidos na legislação referente à transferência de resíduos.”</p> <p>5 - “O produtor inicial dos resíduos ou o detentor devem, em conformidade com os princípios da hierarquia de gestão de resíduos e da proteção da saúde humana e do ambiente, assegurar o tratamento dos resíduos, podendo para o efeito recorrer: (1) a um comerciante; (2) a uma entidade licenciada que execute operações de recolha ou tratamento de resíduos e (3) a uma entidade licenciada responsável por sistemas de gestão de fluxos específicos de resíduos.”</p> <p>6 - “A responsabilidade pela gestão dos resíduos, (...), extingue-se pela transferência para uma das entidades referidas nas alíneas b) e c) do número anterior.”</p> <p>7 - “As pessoas singulares ou coletivas que procedem, a título profissional, à recolha ou transporte de resíduos devem entregar os resíduos recolhidos e transportados em operadores licenciados para o tratamento de resíduos.”</p>
<b>Princípio da proteção da saúde humana e do ambiente (art.º 6)</b>	<p>“Constitui objetivo prioritário da política de gestão de resíduos evitar e reduzir os riscos para a saúde humana e para o ambiente garantindo que a produção, a recolha e transporte, o armazenamento preliminar e o tratamento de resíduos sejam realizados recorrendo a processos ou métodos que não sejam suscetíveis de gerar efeitos adversos sobre o ambiente, nomeadamente poluição da água, do ar, do solo, afetação da fauna ou da flora, ruído ou odores ou danos em quaisquer locais de interesse e na paisagem.”</p>
<b>Princípio da hierarquia dos resíduos (art.º 7)</b>	<p>1 - “A política e a legislação em matéria de resíduos devem respeitar a seguinte ordem de prioridades no que se refere às opções de prevenção e gestão de resíduos: (1) prevenção e redução; (2) preparação para a reutilização; (3) reciclagem; (4) outros tipos de valorização e (5) eliminação.”</p> <p>2 - “No caso de fluxos específicos de resíduos, a ordem de prioridades estabelecida no número anterior pode não ser observada desde que as opções adotadas se justifiquem pela aplicação do conceito de ciclo de vida aos impactos globais da produção e gestão dos resíduos em causa.”</p> <p>3 - “Sempre que se aplique o disposto no número anterior, devem ser tidos em consideração os princípios gerais de proteção do ambiente, da precaução e da sustentabilidade, a exequibilidade técnica e a viabilidade económica, bem como a proteção dos recursos e os impactos globais no ambiente, na saúde humana e sociais de acordo com o disposto nos art.ºs 2 e 6 do DL nº 73/2011.”</p> <p>4 - “Os produtores de resíduos devem proceder à separação dos resíduos na origem de forma a promover a sua valorização por fluxos e fileiras.”</p> <p>5 - “Deve ser privilegiado o recurso às melhores tecnologias disponíveis com custos economicamente sustentáveis que permitam o prolongamento do ciclo de vida dos materiais através da sua reutilização (...).”</p> <p>6 - “No âmbito do disposto no n.º 1, são fixadas as seguintes metas a alcançar até 2020: (1) um aumento mínimo global para 50% em peso relativamente à preparação para a reutilização e a</p>



	reciclagem de resíduos urbanos, incluindo o papel, o cartão, o plástico, o vidro, o metal, a madeira e os resíduos urbanos biodegradáveis e (2) um aumento mínimo para 70% em peso relativamente à preparação para a reutilização, a reciclagem e outras formas de valorização material, incluindo operações de enchimento que utilizem resíduos como substituto de outros materiais, resíduos de construção e demolição não perigosos, com exclusão dos materiais naturais definidos na categoria 17 05 04 da LER.”
<b>Princípio da responsabilidade do cidadão (art.º 8)</b>	“Os cidadãos contribuem para a prossecução dos princípios e objetivos referidos nos artigos anteriores, adotando comportamentos de carácter preventivo em matéria de produção de resíduos, bem como práticas que facilitem a respetiva reutilização e valorização.”
<b>Princípio da regulação da gestão de resíduos (art.º 9)</b>	1 - “A gestão de resíduos é realizada de acordo com os princípios gerais fixados nos termos do DL n.º 73/2011 e demais legislação aplicável e em respeito dos critérios qualitativos e quantitativos fixados nos instrumentos regulamentares e de planeamento.” 2 - “É proibida a realização de operações de tratamento de resíduos não licenciadas nos termos do DL n.º 73/2011.” 3 - “São igualmente proibidos o abandono de resíduos, a incineração de resíduos no mar e a sua injeção no solo, a queima a céu aberto nos termos do art.º 13 do DL n.º 78/2004, de 3 de abril, bem como a descarga de resíduos em locais não licenciados para realização de tratamento de resíduos.”
<b>Princípio da equivalência (art.º 10)</b>	“O regime económico e financeiro das atividades de gestão de resíduos visa a compensação tendencial dos custos sociais e ambientais que o produtor gera à comunidade ou dos benefícios que a comunidade lhe faculta, de acordo com um princípio geral de equivalência.”
<b>Princípio da responsabilidade alargada do produtor (art.º 10-A)</b>	1 - “A responsabilidade alargada do produtor consiste em atribuir, total ou parcialmente, física e ou financeiramente, ao produtor do produto a responsabilidade pelos impactos ambientais e pela produção de resíduos decorrentes do processo produtivo e da posterior utilização dos respetivos produtos, bem como da sua gestão quando atingem o final de vida.” 2 - “Para efeitos da aplicação do disposto no número anterior, o produtor do produto pode ser obrigado a promover alterações na conceção do produto de modo a assegurar a aplicação do princípio estabelecido no art.º 6 e dando origem a menos resíduos na sua produção e posterior utilização, bem como a garantir que o tratamento dos produtos que tenham assumido a natureza de resíduos se realize em conformidade com os princípios estabelecidos nos art.ºs 6 e 7.” 3 - “A aplicação do disposto nos números anteriores está dependente da exequibilidade técnica e da viabilidade económica, dos impactos globais no ambiente, na saúde humana e sociais e do respeito pelo funcionamento adequado do mercado interno.” 4 - “A responsabilidade do produtor do produto pela gestão dos resíduos provenientes dos seus próprios produtos pode ser assumida a título individual ou transferida para um sistema integrado, nos termos da lei, ou ainda através da celebração de acordos voluntários entre o produtor do produto e a ANR.”

## Anexo IV - Definição de subproduto e de fim do estatuto de resíduo (adaptado de DL nº 73/2011)

Designação (artigo)	Definição	Condição
<b>Subproduto (art.º 44-A)</b>	Podem ser considerados subprodutos e não resíduos quaisquer substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo cujo principal objetivo não seja a sua produção quando verificadas as condições indicadas na coluna seguinte.	a) "Existir a certeza de posterior utilização da substância ou objeto"; b) "a substância ou objeto poder ser utilizado diretamente, sem qualquer outro processamento que não seja o da prática industrial normal"; c) "a produção da substância ou objeto ser parte integrante de um processo produtivo"; d) "a substância ou objeto cumprir os requisitos relevantes como produto em matéria ambiental e de proteção da saúde e não acarretar impactos globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana, face à posterior utilização específica".
<b>Fim do estatuto de resíduo (art.º 44-B)</b>	O fim do estatuto de resíduo pode aplicar-se a determinados resíduos quando tenham sido submetidos a uma operação de valorização, incluindo a reciclagem, e satisfaçam critérios específicos a estabelecer nos termos das condições indicadas na coluna seguinte.	a) "A substância ou objeto ser habitualmente utilizado para fins específicos"; b) "existir um mercado ou procura para essa substância ou objeto"; c) "a substância ou objeto satisfazer os requisitos técnicos para os fins específicos e respeitar a legislação e as normas aplicáveis aos produtos"; d) "a utilização da substância ou objeto não acarretar impactos globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana"; e) "os critérios podem incluir valores limite para os poluentes e ter em conta eventuais efeitos ambientais adversos da substância ou objeto."

## Anexo V - Taxas de Gestão de Resíduos (adaptado de DL nº 73/2011)

Designação (artigo)	Definição
<b><i>Taxas gerais de licenciamento (art.º 52)</i></b>	1 - "Sem prejuízo do disposto nos artigos seguintes, o licenciamento e a autorização de operações e de operadores de gestão de resíduos que seja da competência da ANR ou das Autoridades Regionais de Resíduos - ARR, estão sujeitos ao pagamento de taxas destinadas a custear os encargos administrativos que lhe são inerentes."
<b><i>Taxas de licenciamento de sistemas de gestão de fluxos específicos de resíduos (art.º 54)</i></b>	1 - "O licenciamento dos sistemas de gestão de fluxos específicos de resíduos, individuais ou coletivos, está sujeito ao pagamento de taxas destinadas a custear os encargos administrativos que lhe são inerentes."
<b><i>Taxas de licenciamento de Centros Integrados de Recuperação, Valorização e Eliminação de Resíduos perigosos - CIRVER (art.º 55)</i></b>	1 - "O licenciamento dos centros integrados de recuperação, valorização e eliminação de resíduos perigosos está sujeito ao pagamento de taxas destinadas a custear os encargos administrativos que lhe são inerentes."
<b><i>Taxas de registo (art.º 57)</i></b>	1 - "Os produtores e operadores sujeitos a registo no Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos - SIRER, estão obrigados ao pagamento de uma taxa anual de registo destinada a custear a sua gestão." 2 - "A taxa anual de registo é fixada em 25 €, sendo a sua liquidação e pagamento disciplinados pelo regulamento de funcionamento do SIRER."
<b><i>Taxas de gestão de resíduos (art.º 58)</i></b>	1 - "As entidades gestoras de sistemas de gestão de fluxos específicos de resíduos, individuais ou coletivos, de CIRVER, de instalações de incineração e co-incineração de resíduos e de aterros estão obrigadas ao pagamento de uma taxa de gestão de resíduos visando compensar os custos administrativos de acompanhamento das respetivas atividades e estimular o cumprimento dos objetivos nacionais em matéria de gestão de resíduos."
<b><i>Taxas de classificação de subprodutos (art.º 59-A)</i></b>	"São ainda devidas taxas pelos seguintes atos: a) Decisão relativa à classificação de uma substância ou objeto específico como um subproduto; b) Decisão relativa à alteração das condições da decisão referida na alínea anterior."

## Anexo VI - Mercado de resíduos (adaptado de DL nº 73/2011)

<b>Designação (artigo)</b>	<b>Definição</b>
<b><i>Liberdade de comércio (art.º 61)</i></b>	“Sem prejuízo das normas destinadas a assegurar a proteção do ambiente e da saúde pública, nomeadamente das que respeitam aos resíduos perigosos, os resíduos constituem bens de comercialização livre, devendo o mercado dos resíduos ser organizado, promovido e regulamentado de modo a estimular o encontro da oferta e procura destes bens, assim como a sua reutilização, reciclagem e valorização.”
<b><i>Mercado organizado de resíduos (art.º 62)</i></b>	1 – “O mercado dos resíduos deverá integrar um mercado organizado que centralize num só espaço ou sistema de negociação as transações de tipos diversos de resíduos, garantindo a sua alocação racional, eliminando custos de transação, estimulando o seu reaproveitamento e reciclagem, diminuindo a procura de matérias-primas primárias e contribuindo para a modernização tecnológica dos respetivos produtores.” 2 – “O regime de constituição, gestão e funcionamento de mercados organizados de resíduos ou de instrumentos financeiros a prazo sobre resíduos bem como as regras aplicáveis às transações neles realizadas e aos respetivos operadores constam de legislação complementar, sem prejuízo das disposições da legislação financeira que sejam aplicáveis aos mercados em que se realizem operações a prazo.”
<b><i>Organização do mercado de resíduos (art.º 63)</i></b>	1 – “O mercado organizado de resíduos deve funcionar em condições que garantam o acesso igualitário ao mercado, a transparência, universalidade e rigor da informação que nele circula e a segurança nas transações realizadas, bem como o respeito das normas destinadas à proteção do ambiente e da saúde pública.” 2 - “Na criação do mercado organizado de resíduos deve estimular -se a participação dos sectores económicos que os produzem.”
<b><i>Regime financeiro (art.º 64)</i></b>	“O regime financeiro do mercado organizado de resíduos deve visar a cobertura dos custos de gestão do respetivo sistema sem que por seu efeito se introduzam distorções no mercado ou os custos de transação se tornem superiores aos custos de regulação.”
<b><i>Regime contra-ordenacional (art.º 65)</i></b>	“O regular funcionamento do mercado de resíduos é assegurado pela criação de um regime contra -ordenacional relativo ao incumprimento dos princípios, proibições e condições relativos ao seu funcionamento.”

## Anexos VII - Principais documentos legislativos em matéria de resíduos aprovados em Portugal nos últimos anos

	Designação	Descrição	Transposição	Revogação	Alteração
Nacional	DL nº 12/2002, de 19 de fevereiro.	Lei de base do Ambiente.			DL nº 11/1997, de 7 de abril.
	Portaria nº 209/2004, de 3 de março.	Pública a LER e define as operações de valorização e eliminação de resíduos.		Portaria nº 15/1996, de 23 de janeiro. Portaria nº 209/2004, de 3 de março.	
	Despacho nº 24672/2006 (II série), de 30 de novembro.	Determina a criação de um grupo de trabalho para a implementação do MOR.			
	Portaria nº 1023/2006, de 20 de setembro.	Define os elementos que devem acompanhar o pedido de licenciamento das operações de armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos.			
	Portaria nº 320/2007, de 23 de março.	Regulamento de funcionamento do SIRER.			Portaria nº 1407/2006, de 18 de dezembro. Portaria nº 1407/2006, de 18 de dezembro.
	Portaria nº 172/2009, de 17 de fevereiro.	Aprova o regulamento dos CIRVER.			
	Portaria nº 417/2008, de 11 de junho.	Define uma guia específica para o transporte de RCD.			
	DL nº 183/2009, de 10 de agosto.	Estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro, as características técnicas e os requisitos a observar na conceção, licenciamento, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterro.	Diretiva 1999/31/CE, do Conselho, de 26 de abril.	DL nº 152/2002, de 23 de maio.	Regulamento (CE) n.º 1882/2003, de 29 de setembro.
	DL nº 210/2009, de 3 de Setembro.	Estabelece o regime de constituição, gestão e funcionamento do MOR.			
	Despacho nº 3227/2010, de 22 de fevereiro.	Aprovação do Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos -			

		PPRU para o período de 2009-2016.			
	Portaria nº 1324/2010, de 29 de dezembro.	Regulamenta a aplicação do produto da TGR.			Portaria n.º1127/2009, de 1 de outubro.
	Portaria nº 222/2011, de 2 de junho.	Estabelece as regras respeitantes à liquidação, pagamento e repercussão da taxa de gestão de resíduos.			Portaria nº 72/2010, de 4 de fevereiro.
	DL nº 73/2011, de 17 de junho.	Aprova o RGPPGR.	Diretiva 2008/98/CE, de 5 de abril.		DL nº 366 -A/1997, de 20 de dezembro. DL nº 111/2001, de 6 de abril. DL nº 153/2003, de 11 de julho. DL nº 196/2003, de 23 de agosto. DL nº 3/2004, de 3 de janeiro. DL nº 190/2004, de 17 de agosto. 3ª alteração ao DL nº 178/2006, de 5 de setembro. DL nº 46/2008, de 12 de março. DL nº 210/2009, de 3 de setembro.
Comunitária	Diretiva 1994/31/CEE, do Conselho, de 27 de junho.	Relativa aos resíduos perigosos.			Diretiva 1991/689/CEE .
	Decisão 1996/350/CE, da Comissão, de 24 de maio.	Relativa aos resíduos.			Adapta os anexos IIA e IIB da Diretiva 1975/442/CEE.
	Resolução 97/C 76/0, do Conselho, de 24 de fevereiro.	Relativa à estratégia comunitária de gestão de resíduos.			
	Resolução 90/C 122/02, do Conselho, de 7 de maio.	Sobre a política de resíduos.			
	Diretiva 2008/98/CEE, do Conselho, de 18 de março.	DQR.		Diretiva 1991/156/CEE, do Conselho, de 18 de março.	Diretiva 1975/442/CEE.
	Diretiva 2008/98/EC, dos PCE.	Relativa aos resíduos.		Diretiva 2006/12/CE, dos PCE, de 5 de abril.	

## Anexo VIII - Principais medidas implementadas em relação à gestão de RCD, em vários estados-membros da UE (Montecinos e Holda, 2006; UBA, 2008; Mália, 2010; BIO *Intelligence Service*, 2011)

Pais	Medidas
<b>Alemanha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Em 1972 foi publicada a primeira lei na Alemanha sobre a eliminação de resíduos, impondo a mudança das lixeiras para aterros centralizados, controlados e regulados (Weisleder e Nasser, 2006 <i>in</i> Mália, 2010).</li> <li>Em 1986 foi publicada uma lei com vista à prevenção e eliminação de resíduos. Nesta descreviam-se os princípios para a transição da eliminação para a gestão de resíduos e a sua publicação tinha como principal objetivo promover a opção pela prevenção de resíduos produzidos. Caso tal facto não fosse possível, a composição destes deveria ser melhorada, a fim de permitir a sua reutilização ou reciclagem (Mália, 2010).</li> <li>Em 1992 foi publicado um decreto oficial no âmbito da gestão dos RCD, no qual se especificavam os requisitos para a sua prevenção, valorização e eliminação sem afetar a qualidade do meio ambiente. Definia, ainda, metas quantitativas com vista à recuperação e reciclagem dos RCD, como p. ex., uma taxa de reciclagem de 60%, que deveria ser atingida até 1995 (Weisleder e Nasser, 2006 <i>in</i> Mália, 2010).</li> <li>Com base na lei publicada no ano de 1986, entrou em vigor em 1993 um regulamento relativo aos resíduos urbanos (abrangendo os seus vários fluxos, como os resíduos domésticos e os RCD), especificando o tipo de tratamento e eliminação a que estes se deveriam submeter. As metas estabelecidas pelo regulamento publicado foram as seguintes: "(...) reciclar os resíduos que não possam ser evitados; reduzir a toxicidade dos resíduos; e garantir que o tratamento ou eliminação dos resíduos não produz impactes ambientais" (Weisleder e Nasser, 2006 <i>in</i> Mália, 2010). O mesmo regulamento referia, ainda, que os RCD deveriam ser recolhidos e processados separadamente na origem com vista à sua recuperação (Mália, 2010) e estabelecia requisitos relativos à eliminação de resíduos, sendo que as frações que não cumprissem com os mesmos não poderiam ser depositadas em aterro antes de tratadas.</li> <li>Em 1996 foi promulgada a principal lei no âmbito da reciclagem e gestão de resíduos, intitulada "KrW/AbfG". Esta definia "(...) os princípios para o desenvolvimento da gestão de resíduos em direção a uma economia de ciclo fechado", estabelecia "(...) uma nova hierarquia de tratamento de resíduos (...)", onde a prevenção se sobrepunha à reciclagem e consequentemente à eliminação, e definia como responsáveis sobre os resíduos resultantes dos seus produtos, os produtores (Weisleder e Nasser, 2006 <i>in</i> Mália, 2010).</li> <li>"Em 1996, um novo documento foi publicado contendo os requisitos para a demolição ou desconstrução (...)", no qual se exigia um plano de demolição que permitisse a triagem dos materiais recicláveis. Estabelecia, ainda, que a eliminação dos RCD recicláveis deveria ser reduzida em 50%, tendo em conta os níveis verificados no ano de 1995, até 2005 (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> <li>Em 1996 foi assinado um acordo voluntário por várias organizações industriais que visava o universo dos RCD. Deste acordo definiram-se, ainda, "(...) algumas especificações técnicas referentes à utilização de materiais reciclados" e que podem ser consultadas em Mália (2010).</li> <li>Em 2003 foi publicado o "Commercial Wastes Ordinance" - CWO, passando as empresas do sector da construção civil a serem obrigadas a proceder à triagem de resíduos sempre que a sua reciclagem fosse considerada uma opção de valorização viável (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> <li>Em 2010, uma portaria publicada no âmbito dos materiais de construção alternativos resultou na categorização da reutilização de materiais de escavação, resíduos minerais e materiais reciclados como um processo inofensivo do ponto de vista ambiental (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> <li>Em 2010 procedeu-se à alteração da lei publicada em 1996 no âmbito da reciclagem e gestão de resíduos. Mantiveram-se os princípios básicos utilizados aquando da sua publicação, transpôs-se a DQR para o quadro legal interno e harmonizaram-se as diferentes definições de resíduos estabelecidas pela UE e Alemanha. Por último, refira-se, ainda, que a lei publicada em 2010 permitiu um melhoramento da eficiência do processo de gestão de resíduos a fim de se atingir uma taxa de reutilização na ordem dos 80% (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> </ul>
<b>Áustria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Em 1990 foi celebrado um acordo voluntário entre o Ministério da Economia e a Associação Profissional da Indústria da Construção (cf. "Fachverband der Bauindustrie") no sentido de aumentar as cotas de reciclagem no sector da construção (UBA, 2008).</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 1990 foi fundada a “<i>Austrian Construction Materials Recycling Association</i>” (cf. “<i>Österreichischer Baustoff-Recycling. Verband, BRV</i>”), tendo esta associação, sido responsável pela publicação de diversos guias para a utilização de agregados reciclados resultantes do processamento dos RCD: “<i>Guideline for processing of contaminated soil and constructional components</i>” (2004); “<i>Guideline for recycled building materials</i>”, 7<sup>th</sup> edition (2007); “<i>Guideline for recycled construction materials from building construction materials</i>” (2007) e “<i>Guideline on flowable, self sealing trench filling material from recycled, broken material</i>”, 2<sup>nd</sup> edition (2007). Nestes documentos encontram-se descritos os requisitos, os campos de aplicação e as condições gerais para o processamento dos agregados reciclados resultantes do processamento dos RCD (UBA, 2008).</li> <li>• Com base no acordo celebrado em 1990, foi publicado, a 1 de janeiro de 1994, um documento intitulado “<i>Ordinance on the Separation of Materials Generated During Construction</i>” que passou a regulamentar a triagem dos materiais produzidos durante as operações de construção e demolição (segundo este, a triagem deve ser feita no local da obra ou numa central de processamento). Os valores-limite de produção dos RCD acima dos quais os produtores passavam a ser obrigados a proceder à sua triagem a fim da sua valorização podem ser consultados em UBA (2008).</li> </ul>
<p><b>Bélgica</b> (Região de Flandres)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A 2 de julho de 1981 procedeu-se à publicação do “<i>Decree concerning the Prevention and Management of Waste-materials</i>”. Definido no âmbito da prevenção e gestão de resíduos, estabelecia medidas concretas sobre: (1) os locais para a deposição de resíduos industriais e urbanos; (2) o estatuto de “resíduo” e “subproduto”; (3) o transporte de resíduos; (4) a recolha seletiva de resíduos e (5) as taxas ambientais (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• A 28 de junho de 1985 foi publicado o “<i>Decree of the Flemish council concerning Environmental Licences</i>”, visando estabelecer medidas legais sobre as condições de exploração e sobre os procedimentos para o licenciamento de instalações consideradas prejudiciais para o meio ambiente e para a saúde pública (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• A 6 de fevereiro de 1991 procedeu-se à publicação do “<i>VLAREM I - Order of the Flemish Government concerning Environmental Licences</i>”, tratando-se este de um documento que regulamentava os processos de licenciamento e a classificação das instalações consideradas prejudiciais para o meio ambiente e para a saúde pública (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• A 1 de junho de 1995 procedeu-se à publicação do “<i>VLAREM II - Order of the Flemish Government concerning General and Sectorial provisions relating to Environmental Safety</i>”, documento que regulamentava as condições para a exploração das instalações consideradas prejudiciais para o meio ambiente e para a saúde pública (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• A 5 de dezembro de 2003 foi publicado o “<i>Order of the Flemish Government for the establishment of the Flemish Regulations relating to Waste Prevention and Management</i>” - VLAREA, passando este documento a regulamentar a gestão do fluxo de resíduos (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
<p><b>Dinamarca</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 1985, a DEPA passou a regular a reutilização de asfalto, deixando de ser necessário o requerimento da aprovação do uso de asfalto demolido na construção de novas estradas (<i>Waste Center Denmark, 2010 in Mália, 2010</i>). Deste modo, o asfalto passou a ser utilizado na sub-base, e na pavimentação de estradas, em caminhos, e em espaços públicos e similares.</li> <li>• Em 1990 foi definido o imposto sobre os resíduos, com tal medida a refletir-se na taxa de reciclagem dos RCD. Como exemplo, refira-se que em 1984, a taxa de reciclagem era aproximadamente de 15%, ao passo que em 1994, passou a ser superior a 80% (Mália, 2010).</li> <li>• “Em 1990, a DEPA possibilitou a reutilização, sem autorização prévia, de determinados materiais de construção (pedra, telhas e elementos de betão) em processos construtivos, desde que livres de contaminantes e separados na origem” (<i>Waste Center Denmark, 2010 in Mália, 2010</i>), sendo estas condições necessárias para que a utilização dos RCD não fosse sujeita ao imposto sobre resíduos (Montecinos e Holda, 2006).</li> <li>• Em 1995, foi publicado um regulamento municipal sobre a triagem dos RCD (<i>Waste Center Denmark, 2010 in Mália, 2010</i>). As câmaras municipais ficaram responsáveis pela elaboração de regulamentação no âmbito da gestão dos RCD, de modo a aumentar a sua taxa de reciclagem. Os regulamentos a publicar deveriam obrigar a realização da triagem dos RCD na sua origem sempre que o total de produção, em termos quantitativos, desse tipo de resíduos fosse superior a 1 ton (Montecinos e Holda, 2006).</li> <li>• Em 1996, entre o Ministério do Ambiente e da Energia e a Associação Dinamarquesa de Empreiteiros de Demolição (cf. <i>Danish Association of Demolition Contractors</i>), estabeleceu-se um acordo voluntário (intitulado “<i>NMK 96</i>”) que assegurava “(...) a correta demolição das construções de modo a privilegiar a reciclagem dos resíduos através da sua correta separação” (<i>Waste Center Denmark, 2010 in Mália, 2010</i>).</li> <li>• Em 1997 foi alcançada uma taxa de reciclagem de 90% (meta a atingir apenas no ano de 2004), mantendo-se a esse nível deste então (<i>Waste Center Denmark, 2010 in Mália, 2010</i>).</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 1998, com a publicação do “<i>Consolidated Act No. 570</i>”, as taxas sobre os resíduos e matérias-primas passaram a estar regulamentadas (DEPA, 1998 <i>in</i> Montecinos e Holda, 2006).</li> <li>• Em 2000 foram publicadas as “<i>Statutory Order No. 619</i>” e “<i>Statutory Order No. 655</i>”. A primeira visava a gestão de resíduos e a segunda a utilização de resíduos e do solo residual como materiais de construção (DEPA, 2000 <i>in</i> Montecinos e Holda, 2006).</li> </ul>					
Espanha	<b>Legislação Nacional</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A 20 de junho de 1997 foi publicado o “<i>Decreto-Real 952/1997</i>” (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011) tendo este estabelecido o regime jurídico sobre a produção e gestão dos resíduos tóxicos e perigosos com o objetivo de garantir a proteção de saúde pública, defesa do meio ambiente e preservação dos recursos naturais.</li> <li>• A 21 de abril de 1998 foi publicada a “<i>Ley 10/1998</i>” com o objetivo de prevenir a produção de resíduos, estabelecer o regime jurídico no âmbito da sua produção e gestão, fomentar a sua redução, reutilização, reciclagem e outras formas de valorização, e por último, regulamentar o uso de solo contaminado de modo a proteger o meio ambiente e a saúde pública. Com a publicação da referida lei, o governo espanhol passou, ainda, a poder definir normas para diferentes tipos de resíduos. Em termos de conteúdo, salientar o art.º 1.2 no qual é definido que o governo espanhol deve fixar medidas específicas no âmbito da produção e gestão de diferentes tipo de resíduos com o objetivo de prevenir a sua incidência sobre o meio ambiente.</li> <li>• A 1 de junho de 2001 foi aprovado o “<i>Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición</i>” - PNRCDD, que propunha, entre várias medidas instrumentais, a elaboração de uma normativa específica para o fluxo dos RCD baseada nos princípios de hierarquia de gestão de resíduos e da responsabilidade do produtor.</li> <li>• A 27 de dezembro de 2001 estabeleceu-se o “<i>Decreto-Real 1481/2001</i>” (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011) com o objetivo de regulamentar as operações de eliminação de resíduos mediante a sua deposição em aterro, as características deste tipo de infraestruturas, e a sua correta gestão e exploração. A publicação deste diploma teve em consideração a hierarquia de gestão de resíduos definida no art.º 1.1 da “<i>Ley 10/1998</i>”.</li> <li>• A 8 de fevereiro de 2002 foi publicada a “<i>Orden MAM/304/2002</i>” onde se especificam as operações de valorização e eliminação de resíduos, assim como a LER (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> <li>• A 15 de novembro de 2007 foi publicada a “<i>Ley 34/2007</i>” no âmbito da qualidade do ar e da proteção da atmosfera. Autorizou, ainda, o governo espanhol a regular os termos e as condições sobre a obrigatoriedade por parte do produtor de RCD em proceder à triagem dos mesmos em função do tipo de resíduo produzido (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> <li>• A 1 de fevereiro de 2008 foi publicado o “<i>Decreto-Real 105/2008</i>” com o intento de regular a produção e gestão do fluxo dos RCD (Mália, 2010), não definindo, contudo, quaisquer metas quantitativas com vista à sua reciclagem, prevenção ou eliminação. Este decreto aplica os princípios: da responsabilidade do produtor; de prevenção da produção de resíduos; da responsabilidade entre todos os agentes envolvidos na cadeia de produção e gestão dos RCD; de obrigatoriedade de se proceder à triagem dos RCD na origem, a partir de certos valores-limite, de modo a facilitar a sua posterior valorização; e da proibição de deposição dos RCD sem tratamento prévio, de maneira a desencorajar a deposição de resíduos valorizáveis (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> </ul>					
	<b>Legislação das comunidades autónomas</b>					
	<table border="1"> <tr> <td>Aragão</td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 262/2006</i>”, de 27 de dezembro, regulamenta a produção, o armazenamento e a gestão dos RCD (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011), e estabelece o regime jurídico sobre a eliminação e valorização dos resíduos que não resultem de obras de construção ou da reparação de infraestruturas de habitação.</li> <li>• Com a publicação do “<i>Decreto 117/2009</i>”, de 23 de junho, procedeu-se à alteração do “<i>Decreto 262/2006</i>”.</li> </ul> </td></tr> <tr> <td>Ilhas Baleares</td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 10/2000</i>”, de 4 de fevereiro, define os processos de recolha e eliminação dos RCD como operações obrigatórias na sua gestão (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> </ul> </td></tr> <tr> <td>Catalunha</td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 201/1994</i>”, de 26 de julho, regulamenta as operações de gestão dos escombros e RCD (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011) cujo destino final fosse a deposição em aterro, e deste modo, obter o máximo aproveitamento desse tipo de materiais, assim como garantir que as operações de valorização e eliminação dos mesmos fossem executadas tendo em conta a proteção de meio ambiente e conservação da paisagem.</li> <li>• Face à necessidade de se adaptar o disposto no “<i>Decreto 201/1994</i>” às exigências ambientais, procedeu-se à publicação do “<i>Decreto 161/2001</i>”, a 12 de junho, alterando o primeiro. As alterações materializaram-se num melhor</li> </ul> </td></tr> </table>	Aragão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 262/2006</i>”, de 27 de dezembro, regulamenta a produção, o armazenamento e a gestão dos RCD (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011), e estabelece o regime jurídico sobre a eliminação e valorização dos resíduos que não resultem de obras de construção ou da reparação de infraestruturas de habitação.</li> <li>• Com a publicação do “<i>Decreto 117/2009</i>”, de 23 de junho, procedeu-se à alteração do “<i>Decreto 262/2006</i>”.</li> </ul>	Ilhas Baleares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 10/2000</i>”, de 4 de fevereiro, define os processos de recolha e eliminação dos RCD como operações obrigatórias na sua gestão (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> </ul>	Catalunha
Aragão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 262/2006</i>”, de 27 de dezembro, regulamenta a produção, o armazenamento e a gestão dos RCD (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011), e estabelece o regime jurídico sobre a eliminação e valorização dos resíduos que não resultem de obras de construção ou da reparação de infraestruturas de habitação.</li> <li>• Com a publicação do “<i>Decreto 117/2009</i>”, de 23 de junho, procedeu-se à alteração do “<i>Decreto 262/2006</i>”.</li> </ul>					
Ilhas Baleares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 10/2000</i>”, de 4 de fevereiro, define os processos de recolha e eliminação dos RCD como operações obrigatórias na sua gestão (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> </ul>					
Catalunha	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “<i>Decreto 201/1994</i>”, de 26 de julho, regulamenta as operações de gestão dos escombros e RCD (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011) cujo destino final fosse a deposição em aterro, e deste modo, obter o máximo aproveitamento desse tipo de materiais, assim como garantir que as operações de valorização e eliminação dos mesmos fossem executadas tendo em conta a proteção de meio ambiente e conservação da paisagem.</li> <li>• Face à necessidade de se adaptar o disposto no “<i>Decreto 201/1994</i>” às exigências ambientais, procedeu-se à publicação do “<i>Decreto 161/2001</i>”, a 12 de junho, alterando o primeiro. As alterações materializaram-se num melhor</li> </ul>					

		controlo da gestão dos escombros e RCD mediante a emissão de um documento que permitisse as autoridades locais o conhecimento exato do destino final dos resíduos e na atualização da taxa sobre os resíduos.
	Ilhas Canárias	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 161/2001”, publicado a 5 de julho, aprova o “<i>Plan Integral de Residuos de Canarias</i>” (entre 2000 e 2006) (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
	Cantábria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 22/2007”, publicado a 14 de março, aprova o “<i>Plan de Residuos da Cantabria</i>” (entre 2006 e 2010) (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
	Castela-La Mancha	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 189/2005”, publicado a 13 de dezembro, aprova o “<i>Plan de Castilla-La Mancha de Gestion de Residuos de Construcción y Demolicion</i>” (entre 2006 e 2015) (BIO Intelligence Service, 2011), visando servir como instrumento de referência no âmbito da gestão dos RCD em cinco províncias da Comunidade Autónoma da Castilla-La Mancha: Albacete, Ciudad Real, Cuenca, Guadalajara e Toledo. Os RCD abrangidos pelo referido diploma encontram-se identificados com os seguintes códigos na LER: 1701 (01, 02, 03 e 07); 1702 (01, 02 e 03); 1703 (03); 1704 (01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 11); 1706 (04); 1708 (02); e 1709 (04).</li> </ul>
	Castela e Leão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 74/2002”, publicado a 5 de junho, aprova a “<i>Estrategia Regional de Residuos de Castilla y León</i>” (entre 2000 e 2010) (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
	Galícia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 174/2005”, definido a 9 de junho, regulamenta o regime geral da produção e gestão de resíduos, e o registro geral dos produtores e gestores de resíduos da Galícia (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
	Madrid	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Ley 5/2003”, definido a 20 de março, estabelece o regime jurídico no âmbito da produção e gestão de resíduos, incentivando a redução, reutilização, reciclagem e outras formas de valorização, além de regulamentar a utilização de solos contaminados, a fim de proteger o meio ambiente e a saúde pública. No Capítulo V do referido diploma definem-se algumas normas no âmbito da gestão dos RCD (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
	Múrcia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 48/2003”, publicado a 23 de maio, aprova o “<i>Plan de Residuos Urbanos y de Residuos No Peligrosos de la Región de Murcia</i>” (entre o ano de 2001 e 2006) (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• No título II da “Ley 9/2005” introduziu-se um imposto para a eliminação de resíduos perigosos e inertes em aterros (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
	Comunidade Valenciana	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 200/2004”, publicado a 1 de outubro, regulamenta a utilização de resíduos inertes em obras de restauração, aterro ou obras de construção civil (BIO Intelligence Service, 2011). Os resíduos inertes abrangidos por este diploma encontram-se especificados no art.º 4 do mesmo.</li> </ul>
	País Basco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Decreto 423/1994”, publicado a 19 de dezembro, estabelece o regime jurídico aplicável à gestão dos resíduos inertes (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
<b>Estónia</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 2004 procedeu-se à publicação de um documento legislativo no âmbito da gestão de resíduos, <i>RT I 2004, 9, 52</i>. De acordo com este, o Ministério do Ambiente tem o direito de estabelecer os requisitos a cumprir durante as operações de gestão dos RCD, sendo estas, contudo, da responsabilidade do município onde se situam as obras das quais resultam tais resíduos (UBA, 2008).</li> </ul>
<b>Finlândia</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 1996 foi publicado o “<i>Environmental Tax Act (495/1996)</i>”, a partir do qual se definiu o imposto sobre a eliminação de resíduos em aterro (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• Em 1997 publicou-se o “<i>Government Decision on Construction Waste (259/1997)</i>” com o objetivo de reduzir a quantidade e perigosidade dos RCD, bem como aumentar a sua taxa de reciclagem (UBA, 2008 e BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• Em 2000 foi publicado o “<i>Environmental Protection Act (83/2000)</i>”. Dispensa a publicação de uma autorização para se proceder à realização das operações de processamento dos RCD (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• Em 2006 publicou-se o “<i>Government Decree on the Recovery of certain wastes in earth construction (591/2006)</i>”, tendo como objetivo a promoção da valorização de resíduos através da determinação de determinados pré-requisitos (BIO Intelligence Service, 2011).</li> </ul>
<b>Hungria</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 2002 foi publicado o “<i>National Waste Management Plan 2003-2008</i>”, definindo, como meta para 2008, uma taxa de reciclagem de RCD na ordem dos 50% (BIO Intelligence Service, 2011).</li> <li>• Em 2004 foi publicado o “<i>BM-KvVM Decree 45/2004 (VII. 26)</i>” tendo como propósito a regulamentação da gestão dos RCD: o registro de resíduos passou a ser considerado um fator imprescindível para o encaminhamento dos mesmos para as centrais de tratamento, e, como parte integrante do planeamento de obras de construção civil, deveria constar obrigatoriamente</li> </ul>

	<p>uma previsão, em termos quantitativos, dos resíduos a gerar. Na prática, muitas vezes, certos requisitos do regulamento não são respeitados (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 2007 foi publicado o “<i>Government Decree 290/2007 (X. 31)</i>” relativo à documentação inerente a obras de construção civil (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> <li>• Em 2010 publicou-se o “<i>National Waste Management Plan</i>”, no qual se definiram os princípios básicos para a gestão dos RCD (BIO <i>Intelligence Service</i>, 2011).</li> </ul>
<b>Irlanda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desde 1998 que o processamento dos RCD só pode ser realizado em centrais de tratamento com licença de trabalho emitida pela localidade onde estas se encontrem inseridas ou pela <i>Environment Protection Agency</i> - EPA (UBA, 2008).</li> <li>• Em 2002 foi fundado o “<i>National Construction and Demolition Waste Council</i>” - NCDWC. Este conselho resultou de uma iniciativa voluntária por parte dos produtores dos RCD e teve como missão fomentar o cumprimento de metas definidas na Irlanda em matéria de gestão dos RCD: redução em pelo menos 50% da quantidade dos RCD produzidos até 2003, e, pelo menos, 85% até 2013. O conselho passou, ainda, a ter o poder de proceder a pesquisas, preparar planos de ação e desenvolver medidas eficazes para o cumprimento de medidas legais em matéria de gestão dos RCD (UBA, 2008).</li> <li>• Em 2004, o NCDWC publicou o “<i>Guide to Construction &amp; Demolition Waste Legislation</i>” que visou clarificar a legislação em vigor na Irlanda relativa à gestão de resíduos, os regulamentos relativos aos resíduos com interesse para os empreiteiros e os impactos que esses regulamentos teriam sobre a indústria da construção (UBA, 2008).</li> <li>• Em 2006 foi publicado o “<i>Best Practice Guidelines on the Preparation of Waste Management Plans for Construction and Demolition Waste Projects</i>”, tendo como objetivo a promoção de uma gestão integrada do fluxo dos RCD produzidos com vista a um desenvolvimento sustentável, à proteção de meio ambiente e à otimização dos recursos naturais (UBA, 2008).</li> </ul>
<b>Itália</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A 5 de fevereiro de 1998 foi publicado um “<i>Decreto Ministeriale</i>” que veio alterar o “<i>Decreto Legislativo 1997/22</i>”. Este visava todo o tipo de atividade, processo ou método realizado com o propósito de recuperar e reutilizar alguns tipos de resíduos, entre os quais, os RCD.</li> <li>• Os RCD são considerados, de acordo com o quadro legal em vigor, como um tipo de resíduo não perigoso (UBA, 2008).</li> <li>• A valorização dos RCD como material de construção é possível, ainda que, a sua utilização na construção de pavimentos como matéria-prima secundária, ou como material para tratamento de solos só poderá ser autorizada mediante a avaliação do seu comportamento ambiental materializada pela realização de ensaios de lixiviação (UBA, 2008).</li> </ul>
<b>Países Baixos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• “Em 1984, foi lançada a especificação para a utilização de agregados reciclados provenientes da britagem de betão e, em 1986, entrou em vigor a especificação homóloga para agregados reciclados de alvenaria” (Gonçalves, 2007 <i>in</i> Mália, 2010)</li> <li>• Em 1990, foi definida a meta de 90% de reciclagem a cumprir a até ao ano de 2000 (<i>Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment</i>, 2001 <i>in</i> Mália, 2010).</li> <li>• Desde o ano de 1993 que diversas medidas com vista à valorização dos RCD foram sendo instituídas, nomeadamente a obrigação da execução de triagem na origem, “(...) criação de um mercado atrativo para a utilização de produtos reciclados e elevada taxa existente para a deposição de RCD em aterro” (<i>Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment</i>, 2001 <i>in</i> Mália, 2010). Além destas, promoveu-se “(...) os produtos de maior durabilidade, o desenvolvimento de elementos construtivos facilmente desmontáveis e a melhoria de qualidade dos materiais de construção produzidos a partir de RCD” (Mália, 2010).</li> <li>• “Em 1997, foi proibida a deposição dos RCD recicláveis em aterro, sendo mais tarde alargada a proibição a RCD combustíveis (...)” (Mália, 2010).</li> <li>• Em 2001, grande parte dos aterros de resíduos obteve a isenção para a proibição da deposição dos RCD recicláveis e combustíveis pelo facto de não existir capacidade suficiente para a valorização ou incineração dos mesmos (<i>Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment</i>, 2001 <i>in</i> Mália, 2010).</li> <li>• Presentemente, grande parte dos RCD é separada na origem como resultado de várias campanhas de sensibilização, incentivos financeiros e regulações (<i>Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment</i>, 2001 <i>in</i> Mália, 2010), fator que aumentou consideravelmente as possibilidades de reciclagem dos RCD.</li> </ul>
<b>Reino Unido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No ano de 1990, o “<i>Environmental Protection Act</i>” definiu as bases para o controlo da concessão de licenças e outras disposições destinadas a assegurar que o tratamento, a eliminação ou a recuperação de resíduos não prejudicasse o meio ambiente (Mália, 2010). A referida lei referia, ainda, que a responsabilidade pelos resíduos recaia sobre todas as entidades envolvidas na gestão dos mesmos (Voronova, 2006 <i>in</i> Mália, 2010).</li> <li>• Em 1991, o “<i>Duty of Care</i>” declarou que quem produzisse, importasse, transportasse, armazenasse, tratasse ou eliminasse resíduos tinha o dever de garantir que qualquer resíduo produzido fosse processado de forma segura e em conformidade com a lei (Mália, 2010).</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em 1996, definiu-se uma taxa para a deposição dos RCD em aterro, sendo esta diferente, no caso, dos RCD serem ou não inertes. A taxa para os RCD inertes cifrava-se nos 2,85 €/ton, enquanto que para os RCD não inertes a taxa era de 62,53 €/ton (Mália, 2010)</li> <li>• Em 2002, procedeu-se à publicação de um regulamento relativo aos aterros de resíduos que visava prevenir ou reduzir, tanto quanto possível, os efeitos sobre o meio ambiente por parte das referidas infraestruturas (Voronova, 2006 <i>in</i> Mália, 2010). Com a mesma Diretiva, tornou-se ilegal para um operador de aterro de resíduos receber resíduos líquidos ou não tratados (Mália, 2010).</li> <li>• Em 2002, foi introduzido um imposto sobre os agregados naturais, de forma a garantir que o impacto ambiental da extração de agregados se refletisse no preço, encorajando, deste modo a utilização de agregados reciclados (Mália, 2010). Em 2007, o imposto estava fixado em 1,82 €/ton de agregados naturais, tendo aumentado para 2,22 €/ton/ano (<i>Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2007 in</i> Mália, 2010).</li> <li>• Em 2005, a “<i>Waste and Resource Action Programme</i>” (WRAP) desenvolveu o documento intitulado “<i>Quality protocol for the production of aggregates from inert waste</i>” com o propósito de desenvolver um processo de controlo uniforme, a assumir por parte dos produtores de resíduos, aquando do processamento dos RCD. Este documento abrange o controlo a realizar durante do processamento dos RCD nas centrais de tratamento, as descrições dos produtos finais, os critérios de aceitação do produto, os ensaios a realizar e as informações sobre os direitos dos produtores. Em UBA (2008) pode-se consultar a lista sobre o tipo de RCD aceites para a produção de agregados reciclados.</li> <li>• Em 2008, procedeu-se à publicação de uma nova regulamentação, tornando os planos de gestão de RCD na obra obrigatórios para todos os projetos de construção que comportassem um valor de custo superior a 341.880 € (Mália, 2010). Em tal plano registava-se a quantidade e tipo de resíduos produzidos no estaleiro e a forma como os RCD iriam ser reutilizados, reciclados ou eliminados (Mália, 2010). “A implementação do “<i>Site Waste Management Plan</i>” - SWMP, era da responsabilidade do empreiteiro, cabendo às autoridades garantir a aplicação do plano e, em caso de falhas, impor sanções” (Mália, 2010).</li> </ul>
<b>República Checa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Com o “<i>National Waste Management Plan</i>” foram definidas as seguintes medidas: redução para 50% do total de RCD produzidos até 31 de dezembro de 2005; e 75% até 31 de dezembro de 2012, em relação aos valores obtidos durante o ano de 2000 (UBA, 2008).</li> <li>• Em 2008 foi publicado um guia específico para a gestão dos RCD. Este não inclui os valores-limite para a concentração de substâncias perigosas admitidas na composição dos RCD (UBA, 2008).</li> </ul>

## Anexo IX - Principais medidas implementadas em relação à gestão das escórias de aciaria de FAE em vários estados-membros da UE (UBA, 2008)

Pais	Medidas	
<b>Alemanha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acordo com a legislação alemã, a utilização das escórias de aciaria de FAE como material de construção deve atender ao seu comportamento ambiental. Este é avaliado em comparação com os valores-limite de lixiviação que podem ser consultados em UBA (2008).</li> </ul>	
<b>Austria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acordo com o "Austrian Waste Management Plan 2006" as escórias são consideradas como resíduos (UBA, 2008).</li> </ul>	
<b>Bélgica (Região da Valónia)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A 9 de maio de 1985, foi publicada uma lei que decretou a possibilidade de se proceder à valorização das escórias de aciaria de FAE (UBA, 2008).</li> <li>A 5 de outubro de 1989 foi publicada uma "Ordem" que classificava as escórias em três categorias: (1) escórias de aciaria não valorizáveis; (2) escórias de aciaria valorizáveis e (3) escórias de aciaria que carecem de investigação científica mais aprofundada com vista ao estudo das suas características (UBA, 2008).</li> <li>A 6 de maio de 1993, a lei publicada em 1985 foi revogada, passando a emissão da licença para a valorização das escórias de aciaria de FAE a ser da responsabilidade do "Mayor &amp; the College of Aldermen" (UBA, 2008).</li> </ul>	
<b>Espanha</b>	<b>Legislação das comunidades autónomas</b>	
	<b>Catalunha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Primeira comunidade autónoma espanhola a aprovar um documento legislativo, a 15 de fevereiro de 1996, no âmbito da gestão do fluxo das escórias de aciaria procedentes de instalações de incineração de resíduos municipais e de processos metalúrgicos.</li> <li>Encontra-se em vigor o <i>Decreto</i> 32/2009 (Nº 5328) que estabelece o regime jurídico aplicável às atividades de produção, processamento, valorização e utilização das escórias ferrosas. Este diploma tem por objetivo estabelecer os requisitos ambientais e procedimentos administrativos com vista à valorização das escórias de aciaria, assim como as obrigações a cumprir por parte dos produtores deste tipo de escórias de modo a garantir a proteção do meio ambiente e da saúde pública (<i>Decreto</i> 32/2009).</li> </ul>
	<b>País Basco</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Decreto</i> 34/2003 (Nº 1186), publicado a 26 de fevereiro, estabelece o regime jurídico aplicável à valorização e posterior utilização das escórias de aciaria de FAE com o propósito de proteger o meio ambiente e a saúde pública (<i>Decreto</i> 34/2003).</li> </ul>
	<b>Cantábria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>"<i>Decreto</i> 104/2006", publicado a 26 de outubro, estabelece o regime jurídico aplicável à gestão das escórias ferrosas e de aciaria tendo como objetivo fomentar a sua valorização assegurando a proteção do meio ambiente e da saúde pública (<i>Decreto</i> 104/2006).</li> </ul>
<b>Irlanda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>As escórias de aciaria encontram-se sujeitas ao mesmo tipo de legislação definida para os RCD, ainda que, no caso destas, não se tenha estabelecido metas com vista à sua valorização (UBA, 2008).</li> </ul>	
<b>Itália</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Em 1997 foi publicado o "<i>Decreto Legislativo</i> 1997/22" no âmbito da gestão de resíduos, sendo o ponto de partida para a realização de diversas ações de prevenção e reciclagem de resíduos em Itália. Este teve como base a prevenção da produção de resíduos, e definiu que as licenças para as instalações de incineração só deveriam ser concedidas caso essas infraestruturas possuíssem um sistema para a recuperação de energia durante as operações realizadas.</li> <li>A 5 de fevereiro de 1998 foi publicado um "<i>Decreto Ministeriale</i>" que veio alterar o "<i>Decreto Legislativo</i> 1997/22". Este visava todo o tipo de atividade, processo ou método realizado com o propósito de recuperar e reutilizar alguns tipos de resíduos, entre os quais, as escórias de aciaria. Na mesma são definidos os valores-limite de lixiviação para que os resíduos sejam considerados como resíduos valorizáveis, podendo ser igualmente consultados em UBA (2008).</li> </ul>	

